

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Jean-Pierre DELOS

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA COMPRESSIBILITÉ SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES MILIEUX POREUX NATURELS SOUS PRESSION ET TEMPÉRATURE

Soutenue le 11 Septembre 1972 devant la Commission d'Examen :

MM. C. EYRAUD

Président

P. GEVIN

G. BARON

M. ALONSO

J.-C. CUBAUD

Examineurs

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Jean-Pierre DELOS

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA COMPRESSIBILITÉ SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES MILIEUX POREUX NATURELS SOUS PRESSION ET TEMPÉRATURE

Soutenue le Septembre 1972 devant la Commission d'Examen :

MM. C. EYRAUD

Président

P. GEVIN

G. BARON

M. ALONSO

J.-C. CUBAUD

} Examinateurs

UNIVERSITÉ DE LA SORBONNE

1974

Président : M. le Professeur J. BENOIST

1er Vice-Président : M. A. MICHAUD, Maître de Conférences adjoint

2nd Vice-Président : M. P. MICOT, Maître de Conférences

3rd Vice-Président : M. D. MICHAUD, Maître de Conférences

UNITÉ D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

UNIVERSITÉ

DIAGNOSTIC

U.A.R. médecine Orange-Bien-être

U.E.R. médecine Alexis-Carrel

U.F.R. médecine Lefebvre

U.E.R. médecine Yves-Rocher

U.E.R. des Sciences pharmaceutiques

U.E.R. des Techniques de Radiologie

U.E.R. de Médecine Dentaire

U.E.R. d'Anatomie Pathologique et Spectroscopie

U.E.R. des Sciences Biologiques

U.E.R. de Médecine Interne

U.E.R. de Médecine

U.E.R. de Chirurgie et Pédiatrie

U.E.R. des Sciences de la Vie

U.E.R. de Biologie des Cellules et des Tissus

U.E.R. de Médecine Générale

U.E.R. de Médecine

U.E.R. de Médecine

Faculté Universitaire de Médecine et de Pharmacie

Service Universitaire de Radiologie et de Médecine

Service Universitaire de Médecine et de Pharmacie

Service Universitaire de Médecine et de Pharmacie

Service Universitaire de Médecine et de Pharmacie

M. le Professeur D. MICHAUD

M. le Professeur P. CARRE

M. le Professeur A. MICHAUD

M. le Professeur L. MICHAUD

M. A. CARRE : Maître de Conférences adjoint

M. le Professeur J. MICHAUD-ROCHER

M. J. P. CARRE, Maître de Conférences adjoint

M. A. CARRE : Maître de Conférences adjoint

A mes parents,

M. le Professeur J. MICHAUD

A la mémoire de Christian LONGERINAS

M. le Professeur J. MICHAUD

M. le Professeur L. MICHAUD

M. le Professeur A. MICHAUD

M. le Professeur J. MICHAUD

M. le Professeur A. MICHAUD

M. le Professeur J. MICHAUD

M. le Professeur A. MICHAUD

M. le Professeur J. MICHAUD

M. le Professeur A. MICHAUD

M. le Professeur J. MICHAUD

M. le Professeur A. MICHAUD

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD

LYON

Président : M. le Professeur J. BOIDIN.

1er Vice-Président : M. R. TOURAINÉ, Maître de Conférence agrégé.

2ème Vice-Président : M. P. PONCET, Maître-Assistant.

3ème Vice-Président : M. D. SETTELEN, Etudiant.

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

UNITES

DIRECTEURS

U.E.R. médicale Grange-Blanche	M. le Professeur D. GERMAIN
U.E.R. médicale Alexis-Carrel	M. le Professeur C. GIROD
U.E.R. médicale LYON-Nord	M. le Professeur A. BERTOYE
U.E.R. médicale LYON-Sud-Ouest	M. le Professeur L. TOLOT
U.E.R. des Sciences pharmaceutiques	M. M. CARRAZ, Maître de Conférences agrégé
U.E.R. des Techniques de Réadaptation	M. le Professeur P. MOUNIER-KUHN
U.E.R. de Biologie humaine	M. J.C. CZYBA, Maître de Conférences agrégé
U.E.R. d'Education Physique et Sportive	M. J. SAPIN, Professeur E.P.S.
U.E.R. des Sciences Odontologiques	M. R. VINCENT
U.E.R. de Mathématiques	M. le Doyen J. BRACONNIER
U.E.R. de Physique	M. le Professeur M. DUFAY
U.E.R. de Chimie et Biochimie	M. le Professeur D. GAUTHERON
U.E.R. des Sciences de la Nature	M. le Professeur L. DAVID
U.E.R. de Biodynamique et Psychopédagogie	M. le Professeur R. FONTANGES
U.E.R. de Physique nucléaire	M. le Professeur A. SARAZIN
U.E.R. de Mécanique	M. le Professeur J. MATHIEU
Observatoire	M. le Professeur J.H. BIGAY
Institut Universitaire de Technologie 1	M. le Professeur B. POUYET
Institut Universitaire de Technologie 2	M. J. GALLET

Secrétaire Général : M. P. IZAUTE.

Président : M. le Professeur J. KUBIK.

1er Vice-Président : M. R. WURAC, Maître de Conférences Agrégé.

2nd Vice-Président : M. P. WURAC, Maître de Conférences.

3ème Vice-Président : M. R. WURAC, Maître de Conférences.

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

M. le Professeur J. KUBIK.

A V A N T - P R O P O S

Avant de présenter ce travail, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur EYRAUD pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de cette thèse.

Qu'il me soit permis d'exprimer à Messieurs les Professeurs CUBAUD et GEVIN ma très sincère gratitude pour la confiance qu'ils me témoignent en acceptant de siéger à la Commission d'Examen.

Je suis particulièrement heureux de pouvoir adresser à Monsieur le Professeur BARON mes plus vifs remerciements pour son total soutien et pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche. Je le remercie très respectueusement de l'honneur qu'il me fait en siégeant à ce jury.

J'ai effectué ce travail sous la direction de Monsieur ALONSO, Chef du Service Physique des Réservoirs au Centre de Recherches de PAU. L'intérêt constant qu'il a témoigné pour mon travail, les encouragements et les conseils nombreux qu'il m'a toujours prodigués, ainsi que les vastes possibilités de son laboratoire, dans lequel il a bien voulu m'accueillir m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je le prie de trouver ici le témoignage de ma respectueuse et profonde gratitude, et je voudrais en son nom remercier la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine et son Personnel pour l'aide matérielle et humaine qui m'a été accordée.

"Tout a changé pour l'homme une première fois quand il a découvert le raisonnement mathématique, une seconde fois quand il a compris que le raisonnement doit tenir compte des faits."

A. MAUROIS

INTRODUCTION

Le progrès de l'humanité a toujours été lié à la recherche et l'utilisation de sources d'énergie. Nous ne discuterons pas l'intérêt et la primordialité de l'une d'entre elles : le pétrole.

Pour mettre à sa portée cette richesse, l'homme a été amené à résoudre un certain nombre de problèmes d'écoulement des fluides dans les roches et de comportement de ces dernières. La solution de ces problèmes doit le conduire à l'estimation des réserves initiales et à celle de la récupération d'huile de gisement. Pour satisfaire aux besoins vitaux et répondre aux exigences économiques et politiques, ces estimations constituent les objectifs essentiels d'une Société Pétrolière.

Du point de vue de la physique, nous associerons à ces notions les paramètres de porosité, perméabilité, compressibilité.

Le premier concrétise la fraction du volume de roche réservoir susceptible d'être occupée par les hydrocarbures.

Le deuxième est la mesure de la facilité avec laquelle un milieu poreux se laisse traverser par des fluides.

Enfin la compressibilité représente la variation de volume d'un milieu lors d'une variation de son état de tension.

Le présent travail peut être rattaché aux disciplines de la mécanique des roches et des fluides dans les milieux poreux.

La mécanique des roches a pendant longtemps été un domaine de préoccupation où l'on ne pouvait se borner qu'à des considérations d'ordre qualitatif.

Les plissements montagneux donnent l'impression de ductilité alors que nous connaissons aux roches une grande fragilité. Ce n'est que lentement que la mécanique des roches est apparue aux chercheurs et ingénieurs en tant que science.

Les géologues ont d'abord fait appel à la mécanique des solides. Mais le sujet n'est pas facile du fait que le milieu est discontinu, hétérogène, poreux et altérable. L'hétérogénéité apparaît au niveau de la minéralogie, de la nature physico-chimique de l'assemblage des grains, et enfin au niveau des conditions et de l'énergie de cimentation.

En fait, ce milieu dépend de nombreux paramètres et échappe à toute théorie élaborée.

Certaines théories, que nous verrons par la suite, posent des hypothèses qui facilitent l'exposé mathématique mais rendent à la fois ces théories difficilement applicables.

Les paramètres sont nombreux, mais les facteurs essentiels sont : les contraintes mécaniques, le temps, la température et la présence d'un liquide interstitiel dont l'influence est à la fois mécanique (pression de pores) et chimique (dissolution et lavage).

Il est intéressant de faire une classification mécanique des roches. Nous distinguerons :

- les roches élastiques : ce sont des roches à fortes caractéristiques mécaniques (granite, calcaires compacts, gneiss). On peut dire que le fluage est inexistant. Pour ces roches et tant qu'elles restent élastiques fragiles, les manifestations du fluage affectent les coefficients d'élasticité d'une erreur de 10 % et la résistance d'une erreur de 20 % environ.

- les roches avec serrage : ces roches se caractérisent par une résistance ultime élevée et par un fluage asymptotique important (calcaire lutétien, gypse).
- les roches plastiques : ce sont essentiellement les craies et la potasse.

Des recherches menées par MORLIER à l'Ecole Polytechnique (1) ont permis de mettre en évidence plusieurs comportements. Mais il faut bien voir que ces comportements sont des clichés à l'intérieur d'une gamme continue.

Comportement instantané	Comportement différé
Elasticité	Visco-élasticité, parfois déformation "pseudo-visqueuse".
Elasticité avec serrage	Visco-élasticité avec serrage.
Plasticité (écrouissage limité)	Visco plasticité, phénomènes de rupture différés.
Ductilité (écrouissage illimité).	

L'hétérogénéité d'un gisement pose le problème de sa représentativité au laboratoire. Pour ne pas être hasardeuse, toute étude doit s'appuyer sur une loi statistique. La nécessité se fait donc sentir de posséder un appareillage "standardisé" qui permet de dresser les fiches signalétiques d'un certain nombre d'échantillons de roches remontés au cours de carotages ; ceci a pour but d'approcher les valeurs des paramètres du gisement, en particulier la porosité et la perméabilité.

Ces installations permettent de réaliser des mesures en série, mais le plus souvent dans des conditions de pression et de température ambiantes, très différentes de celles régnant dans le gisement.

On ressent donc l'intérêt de recréer ces conditions "in situ" sur les roches à étudier.

Un échantillon de roche, au sein d'un gisement, est soumis à trois contraintes de nature différente :

- . Une contrainte verticale σ_z appelée contrainte géostatique, due à la hauteur des couches de sédiments.
- . Une contrainte latérale $\sigma_{x,y}$ que nous appellerons contrainte de confinement.
- . La pression p du fluide présent dans les pores de la roche.

Cet état de tension modifie de façon plus ou moins importante les paramètres déterminés par les mesures de routine.

De plus, la production d'un gisement provoque l'abaissement de la pression de pores, ce qui entraîne une déformation du milieu poreux et par suite une variation progressive de la porosité et de la perméabilité.

Or cette modification intervient comme facteur correctif des mesures classiques, et sa connaissance en est d'un intérêt d'autant plus accru que l'évaluation des réserves en hydrocarbures prend justement pour bases les modifications dans le temps des caractéristiques des fluides, tout en étant d'ordinaire obligée de faire abstraction de celles du milieu poreux.

En effet considérons l'analyse du problème.

Soit un gisement d'huile dont les réserves initiales sont N_0 . La pression de fluide initiale est P_0 . Appelons $\mathcal{C}$ le coefficient global

de compressibilité du gisement.

Si nous effectuons une production des forages, nous allons produire une quantité n et réduire la pression de P_o à P .

On appelle coefficient de récupération le rapport $\frac{n}{N}$ qui s'écrit à un instant donné :

$$\frac{n}{N} = \mathcal{C} \cdot (P_o - P)$$

Si l'on ne considère que la compressibilité de l'huile dans cette production, on peut écrire :

$$\frac{n}{N_h} = C_h \cdot (P_o - P)$$

Cette relation permet de calculer une valeur N_h pour N , puisque l'on a mesuré n , P_o , P et que C_h est habituellement bien déterminé par une analyse PVT.

Si l'on veut en plus tenir compte de la roche et de l'eau présente dans le réservoir, la nécessité s'impose de connaître le coefficient global de compressibilité $\mathcal{C}$.

Celui-ci sera naturellement une fonction de C_h , C_p (compressibilité de pores), C_w (compressibilité de l'eau présente dans le réservoir), ainsi que des saturations respectives en huile et en eau.

Par un raisonnement que nous verrons dans la suite de ce travail, on peut exprimer ce coefficient par l'expression suivante :

$$\mathcal{C} = C_h + \frac{C_p}{1 - S_w} + \frac{C_w \cdot S_w}{1 - S_w}$$

On constate que $\mathcal{G}$ est toujours supérieur à C_h . C'est pourquoi, le fait de ne pas tenir compte de la compressibilité de la roche et de celle de l'eau nous conduit toujours à trouver des valeurs trop élevées pour les réserves N.

Par suite il apparaît aussi que le fait de négliger cette compressibilité nous conduit à trouver une valeur trop faible pour la récupération totale.

C'est donc l'importance et l'influence de la compressibilité de la roche que nous nous sommes proposés de mettre en évidence. Nous avons apporté des efforts particuliers pour recréer les conditions de pression et de température du gisement, et cela a souvent été accompagné d'efforts financiers relativement importants. Nous avons apporté également un soin attentif aux méthodes métrologiques ainsi que sur le choix ou la conception de certains appareils de mesure.

Dans les revues techniques mises à notre disposition, nous avons pu trouver mentionné un certain nombre d'expériences réalisées principalement en U.R.S.S., aux Etats-Unis et en France. Ces études présentent en général un rapport direct avec des cas spécifiques de gisement.

Nous noterons une étude très intéressante réalisée par GUDOK et KUSAKOV (3) tendant à démontrer par des expériences sur des roches de gisement l'influence des contraintes de confinement ainsi que la présence d'argile sur la perméabilité à différents liquides. Un regret peut être exprimé, c'est qu'ils n'aient pas tenu compte de la température dans leurs essais.

D'autres études ont été effectuées sur l'influence de la contrainte sur la perméabilité des roches pétrolifères et sont en assez bonne corrélation.

Nous citerons les essais réalisés par P. LE TIRANT, M. de BRUYNE, Y. CASTEL et BARON (5) et (11) ainsi que ceux de A.S. Mc LATCHIE, R.A. HEMSTOCK et J.W. YOUNG (6), et plus récemment ceux de NEWMAN (12).

Ceux de D.O. WYBLE (7) et de CHIERICI, CIUCCI, EVA et LONG (8) fournissent des résultats supplémentaires concernant à la fois compressibilité et perméabilité.

Signalons, en outre que FATT (9) et WILSON (10) ont également abordé le problème des mesures de perméabilité relative dans les conditions de gisement.

Enfin, l'influence des contraintes sur les déformations de roches de nature différente a particulièrement été approfondie par BAIDYUK (4) et cela pour des gammes de contraintes s'étendant jusqu'à 8 000 bars et pour des températures allant jusqu'à 1000°C. L'étude porte notamment sur des marbres, des craies, des dolomites, des argiles et des grés.

Du point de vue de l'interprétation théorique du comportement des roches sous contraintes, la base incontestable est la théorie de BIOT publiée en 1941. Mais à cause des difficultés rencontrées dans l'application d'une telle théorie aux roches pétrolifères, c'est en fait à GEERTSMA (13) et (14) et à VAN DER KNAAP (15) que revient le mérite d'avoir jeté un pont entre la théorie et l'expérience. Nous ne manquerons pas d'y associer les travaux de GASSMANN (16).

Toutefois, ayant noté dans l'application de ces théories des dispersions de résultat assez importantes, nous avons tenté dans l'exposé théorique de les compléter par des définitions nouvelles, ce qui nous a conduit à éviter certaines hypothèses de départ.

Nous avons cru utile également d'établir des corrélations entre les résultats expérimentaux que nous avons obtenus et ceux calculés à partir de la théorie de la mécanique des roches utilisant principalement le module d'YOUNG, le coefficient de POISSON et la cohésion granulaire C.

Pour conclure, on pourra trouver dans les chapitres suivants :

- Une étude théorique de la déformation des milieux poreux sous contrainte.
- La description des installations et des expérimentations réalisées.
- Les résultats expérimentaux obtenus.
- Leur interprétation à l'aide des théories existantes.

En dernier lieu, nous nous efforcerons de montrer les répercussions possibles de ces résultats, en faisant une corrélation avec les données d'un gisement.

C H A P I T R E I

THEORIE DE LA DEFORMATION DES MILIEUX POREUX

ET DE QUELQUES PROPRIETES

A - GENERALITES - RAPPEL DES CONCEPTS DE RHEOLOGIE

La Rhéologie est l'étude générale des déformations de la matière. Elle est l'extension aux corps naturels de l'étude faite en mécanique physique sur les solides (et les fluides).

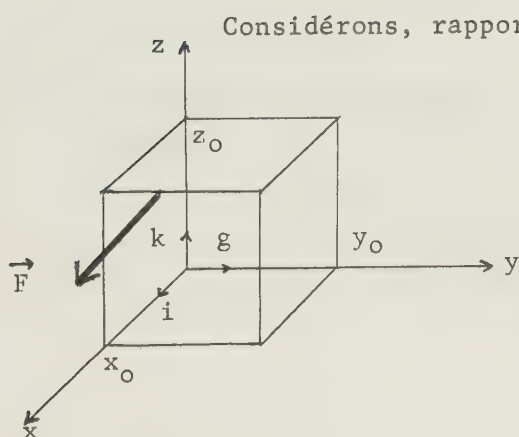
Cette extension nécessite :

- La substitution aux équations relativement simples de la mécanique physique des équations plus compliquées mais plus conformes au comportement réel des corps naturels.
- La considération de la structure de ces corps, alors que la mécanique physique se borne à l'étude des milieux continus.
- L'étude des propriétés des milieux qui peuvent être fonction de leur histoire (histoire géologique antérieure du milieu).

1) La mécanique physique et son insuffisance

La mécanique physique étudie les milieux continus, c'est-à-dire décomposables en éléments de volume infiniment petits sur chacun desquels s'exerceront les forces de contact des éléments voisins et dont la masse spécifique sera définie en chaque point :

$$\rho = \frac{dm}{dv}$$



Considérons, rapporté à un système d'axes trirectangles un parallélépipède rectangle obtenu en prenant trois longueurs x_0 , y_0 , z_0 sur chacun de ces axes.

La face de côté $z = 0$ étant fixée, exerçons la force $\vec{F}_i$ sur la face de côté $z = z_0$.

La tension tangentielle ainsi exercée s'écrit :

$$\vec{f} = \frac{F}{x_0 \cdot y_0} \vec{i}$$

et donne naissance à une déformation $\vec{\gamma}$.

Examinons les réactions possibles du milieu.

La déformation $\vec{\gamma}$ fait naître une contrainte qui s'oppose à la tension tangentielle $\vec{f}$ et qui à l'équilibre est égale à $-\vec{f}$.

A toute valeur de f correspond une valeur de γ .

L'expression $\vec{f} = \text{fonct}(\vec{\gamma})$ définit un solide élastique. Le cas particulier le plus simple est celui de la proportionnalité contrainte-déformation :

$$\vec{f} = \mu \vec{\gamma} \text{ où } \mu \text{ est appelé module de rigidité.}$$

Ce cas définit la loi de HOOKE.

Malheureusement, il n'existe pas de solides rigoureusement Hookiens et la mécanique physique est ici insuffisante. L'étude de cette catégorie de corps est du ressort de la Rhéologie.

2) Concepts de la Rhéologie - Coexistence de la rigidité et de la viscosité

Nous généraliserons en disant que les corps naturels se comportent comme des solides ou comme des fluides suivant la durée de l'action qui tend à les déformer (temps de relaxation).

D'où les définitions possibles :

- Fluides : milieux dont le temps de relaxation est très faible.
- Solides : milieux dont le temps de relaxation est très grand.

Dans le solide élastique parfait ($f = \nu \gamma$) la contrainte subsiste pendant toute la déformation. Supposons au contraire qu'elle diminue spontanément avec le temps, la tension tangentielle étant maintenue constante, le maintien de l'équilibre nécessite un accroissement continu de la déformation, c'est-à-dire un écoulement.

Considérons le cas où la variation $- df$ de la contrainte f , dans le temps dt est proportionnelle à la valeur de celle-ci :

$$- df = f \cdot \frac{dt}{T} \quad (T = \text{temps de relaxation du milieu})$$

L'équilibre nécessite :

$$d\gamma = \frac{1}{\nu} df \quad \text{d'où } f = -\nu \cdot T \cdot \frac{d\gamma}{dt} = -\nu \cdot T \cdot G$$

Ce concept n'a en réalité qu'une valeur qualitative.

Si le solide élastique Hookien reprend sa forme initiale dès que cesse la tension tangentielle qui lui a donné naissance, il n'en est pas toujours de même des solides naturels, ceux-ci en effet conservent un résidu de déformation et leur module de rigidité est modifié.

Considérons un solide dont le module de rigidité sous l'influence d'une tension tangentielle évolue selon la loi :

$$\nu = \nu_0 \cdot \frac{T}{t}$$

On en déduit que :

$$\gamma = \frac{f}{\mu} = \frac{f \cdot t}{\mu_0 \cdot T}$$

Il peut évoluer aussi selon cette autre loi :

$$\mu = \frac{\mu_0 \cdot T + \mu_{\infty} t}{T + t} \Rightarrow \gamma = \frac{f}{\mu} = f \frac{T + t}{\mu_0 T + \mu_{\infty} t}$$

ou en posant :

$$\theta = \frac{\mu_0}{\mu_{\infty}} \cdot T, \quad \gamma = \frac{\frac{f}{\mu_0} \cdot \theta + \frac{f}{\mu_{\infty}} \cdot t}{\theta + t} = \frac{\gamma_0 \cdot \theta + \gamma_{\infty} \cdot t}{\theta + t}$$

Un corps qui, soumis à une tension tangentielle suit cette loi subit une déformation élastique et une déformation réactive fonction croissante du temps, tendant vers une valeur asymptotique, $\gamma_{\infty} - \gamma_0$.

Considérons maintenant ce qu'implique l'élasticité des corps naturels dont la Rhéologie vient de nous donner une idée quant à leur déformation.

B - ELASTICITE D'UN MILIEU POREUX NATUREL

Les théories des solides élastiques et des fluides parfaits sont sans doute, en mécanique des milieux continus, celles qui s'apparentent le plus à la mécanique rationnelle. La résolution des problèmes physiques y est ramenée à celle de problèmes mathématiques, et les problèmes physiques bien posés conduisent en général à des problèmes mathématiques bien posés, pour lesquels l'existence et l'unicité de la solution peuvent être démontrées.

La théorie de l'élasticité n'en reste pas moins un champ de recherches

très vaste, les problèmes concernant les déformations finies ou la stabilité des milieux continus élastiques n'ont en effet reçu de solutions rigoureuses que dans quelques cas particuliers.

Un bon exemple en est la théorie de BIOT qui expose le comportement statique des milieux poreux et qui, sans chercher d'application à la géophysique, constitue la seule base théorique sérieuse et générale existant.

1) Théorie de BIOT

Le milieu poreux saturé idéal considéré ici possède les propriétés suivantes :

- Liquide et solide sont continus, c'est-à-dire que le milieu n'est pas pulvérulent et que seule compte la porosité ouverte.
- Macroscopiquement, le milieu est isotrope.
- Le solide est purement élastique.
- Le liquide est compressible et purement visqueux.
- Les pores sont d'allure régulière.

Définitions

La déformation infiniment petite d'un milieu à partir d'un état initial est représentée par un tenseur symétrique e_{ij} dont voici la définition sommaire.

Soit $M(x, y, z)$ un point du milieu élastique dans l'état initial, $M'(x', y', z')$ la position de ce point après déformation. Les composantes u_x , u_y et u_z du vecteur $\overrightarrow{MM'}$ appelé vecteur déplacement, sont des fonctions de x , y , z .

Le vecteur déplacement de la matrice solide est noté $\vec{u}$ (u_x, u_y, u_z) et le vecteur déplacement du liquide est noté $\vec{U}$ (U_x, U_y, U_z).

Ce dernier est défini de façon que le volume de liquide déplacé à travers une surface unité soit $\varphi \cdot U$, φ étant la porosité.

Si on pose $e_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$, ..., $e_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$

le tenseur déformation du solide poreux est e_{ij} et la déformation isotrope est appelée $e = \text{div } \vec{u}$, ou encore :

$$e = \sum_{ij} \delta_{ij} \cdot e_{ij} \quad (i = j = x, y, z)$$

$$\delta_{ij} = 0 \quad \text{si } i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1 \quad \text{si } i = j$$

Posons $\vec{W} = \varphi(\vec{U} - \vec{u})$, c'est-à-dire en volume par unité de surface du matériau, l'écoulement relatif de liquide par rapport au solide.

Les déformations du liquide seront représentées par :

$$\zeta = - \text{div. } \vec{W} = - \text{div } \varphi (\vec{U} - \vec{u})$$

$$\zeta = \varphi (e - \varepsilon) \quad \text{avec } \varepsilon = \text{div } \vec{U}$$

Les contraintes totales, c'est-à-dire s'exerçant sur le solide saturé sont appelées t_{ij} . On peut écrire :

$$t_{ij} = \sigma_{ij} - \varphi \cdot \delta_{ij} \cdot p$$

où σ_{ij} sont les contraintes appliquées au solide seul et p est la pression de pore (ou de fluide), supposée constante dans tout le corps puisque nous parlons d'équilibres statiques.

Relations de comportement

Les relations contraintes-déformations sont linéaires et la matrice des coefficients élastiques est une matrice carrée de 7 x 7, symétrique, car on suppose l'existence d'une énergie potentielle pour le système solide + liquide.

$$\begin{bmatrix} t_{xx} \\ t_{yy} \\ t_{zz} \\ t_{yz} \\ t_{zx} \\ t_{xy} \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) & (\lambda + \alpha^2 M) & (\lambda + \alpha^2 M) & 0 & 0 & 0 & -\alpha M \\ (\lambda + \alpha^2 M) & (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) & (\lambda + \alpha^2 M) & 0 & 0 & 0 & -\alpha M \\ (\lambda + \alpha^2 M) & (\lambda + \alpha^2 M) & (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M) & 0 & 0 & 0 & -\alpha M \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ -\alpha M & -\alpha M & -\alpha M & 0 & 0 & 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{zx} \\ e_{xy} \\ \zeta \end{bmatrix}$$

Sous forme tensorielle, on peut écrire :

$$\begin{aligned} t_{ij} &= 2\mu \cdot e_{ij} + \delta_{ij} \left[(\lambda + \alpha^2 M) e - \alpha \cdot M \cdot \zeta \right] \\ P &= -\alpha \cdot M \cdot e + M \cdot \zeta \end{aligned}$$

Signification des quatre constantes élastiques λ, μ, α, M :

Les équations précédentes impliquent :

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{P}{M} + \alpha \cdot e \\ t_{ij} &= 2\mu \cdot e_{ij} + \delta_{ij} (\lambda \cdot e + \alpha^2 \cdot M \cdot e - e - \alpha \cdot P - \alpha^2 \cdot M \cdot e) \\ t_{ij} + \delta_{ij} \cdot \alpha \cdot P &= 2\mu \cdot e_{ij} + \delta_{ij} \cdot \alpha \cdot e \end{aligned}$$

Cette dernière relation montre que les e_{ij} sont entièrement déterminés à partir des t_{ij} et p et que l'on peut appeler contraintes effectives la somme $t_{ij} + \delta_{ij} \cdot \alpha \cdot p$

Les contraintes effectives ont une grande importance en mécanique des roches car les expériences montrent que la rupture des matériaux poreux, à condition qu'elle ait lieu par glissement, dépend uniquement d'elles.

λ et μ sont les coefficients de LAME ; μ est déterminé dans un essai de cisssion pure :

$$t_{ij} = t_{xy} \implies t = 2\mu \cdot e$$

Les mesures de t et e nous donneront μ .

Nous déterminons λ par un essai de compressibilité drainée :

$$t_{ij} = \delta_{ij} \cdot t, \quad p = 0$$

Donc :

$$\mathcal{E} = \alpha \cdot e$$

$$t = \frac{1}{3} \left[\lambda + 2\mu + \alpha^2 \cdot M + 2(\lambda + \alpha^2 \cdot M) \right] \cdot e - \alpha \cdot M \cdot \mathcal{E}$$

$$t = \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu \right) e \quad \text{d'où } \lambda \text{ et } \mu$$

Après l'expérience de compressibilité drainée précédente, qui nous donne le module $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, faisons une expérience de compressibilité lente, c'est-à-dire qu'à chaque instant $\sigma_{ij} = \delta_{ij} \cdot p$

Nous mesurons alors le module de compressibilité $K' = \frac{K}{1 - \alpha}$

$$\text{d'où } \alpha = 1 - \frac{K}{K'}$$

Si la porosité est totalement ouverte, nous voyons que :

$$K' = K_s \text{ (module de compressibilité du solide).}$$

Physiquement il est alors évident que $\alpha \ll 1$.

Quelle est la borne inférieure de α ?

Pour cela, nous passons des variables t_{ij} , e_{ij} , p , aux variables σ_{ij} , $s = -\varphi \cdot p$, e_{ij} , $\varepsilon = e - \frac{s}{\varphi}$.

Les relations de comportement deviennent :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{zy} \\ \sigma_{yx} \\ \sigma_{xz} \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2N + A & A & A & 0 & 0 & 0 & Q \\ A & 2N + A & A & 0 & 0 & 0 & Q \\ A & A & 2N + A & 0 & 0 & 0 & Q \\ 0 & 0 & 0 & N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N & 0 \\ Q & Q & Q & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{zy} \\ e_{yx} \\ e_{xz} \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

où $N = \mu$

$$A = \lambda + M (\alpha - \varphi)^2$$

$$Q = \varphi (\alpha - \varphi) M$$

$$R = \varphi^2 \cdot M$$

Cherchons le signe de Q .

$$\text{Si } p = 0 \Rightarrow Q \cdot e + R \cdot \varepsilon = 0 \Rightarrow Q = - \frac{R \cdot \varepsilon}{e}$$

$$\text{Si } e = 0 \Rightarrow R = \frac{s}{\varepsilon} = \frac{-\varphi \cdot p}{-\frac{s}{\varphi}} = \frac{\varphi^2 \cdot p}{s}$$

$\mathcal{E}$ a le même signe que P , donc R est positif dans le cas où e est positif. R étant le rapport $\frac{s}{\mathcal{E}}$ lorsque $e_{ij} = 0$, et s étant négatif, $\mathcal{E}$ est négatif quand e est positif.

Donc Q est positif $\Rightarrow \alpha - \varphi > 0$

D'où $\alpha > \varphi$

Nous connaissons donc 2 bornes à α

$$\varphi \leq \alpha \leq 1$$

α étant facilement connu par l'expérience, le fait qu'il vérifie ou non cette double inégalité est un critère pour savoir si le corps est de BIOT ou non. Par exemple, pour certains grés, α est voisin de 0 ; dans ces conditions, ces grés se rapprochent plus des corps pulvérulents que du corps idéal décrit ici.

Outre les deux essais de compressibilité décrits ci-dessus, nous pouvons encore imaginer un essai de compressibilité en vase clos, c'est-à-dire à $\mathcal{E} = 0$. Le module de compressibilité alors mesuré est donné par :

$$t = \frac{1}{3} (\lambda + 2\mu + \alpha^2 M + \lambda + \alpha^2 M + \lambda + \alpha^2 M) e$$

c'est-à-dire :

$$t = (\lambda + \alpha^2 M + \frac{2\mu}{3}) e$$

Appelons K_c ce module :

$$K_c = \lambda + \alpha^2 M + \frac{2}{3}\mu$$

$$D'où \quad M = \frac{K_c}{\alpha^2} - \frac{(\lambda + \frac{2}{3}\mu)}{\alpha^2}$$

Or $\lambda + \frac{2}{3}\mu$ est le module K de compressibilité drainée.

Donc :

$$M = \frac{K_c - K}{\alpha^2}$$

BIOT et WILLIS d'une part, MORLIER d'autre part ont montré que le coefficient M avait pratiquement toujours la valeur :

$$M = \frac{K_f}{\phi} \quad (\text{avec } K_f \text{ module de compressibilité du fluide}).$$

En conclusion il faut constater malheureusement un fréquent désaccord entre la théorie de BIOT et les résultats expérimentaux ; l'explication est la suivante :

- La théorie concerne des matériaux tout à fait idéaux; il faut se reporter aux valeurs du coefficient α .
- La théorie s'applique à des corps ayant une porosité assez régulière, ce qui n'est pas le cas pour les roches usuelles.

2) Comportement non linéaire du milieu poreux élastique et isotrope

Par analogie avec le tenseur de contraintes d'un milieu homogène, le tenseur de contraintes pour le milieu poreux peut être écrit de manière conventionnelle :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Les composants σ_i et τ_{ij} représentent l'action des forces sur les faces d'un cube unité en matériel poreux.

Ce tenseur peut être décomposé en :

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\sigma} \end{bmatrix} \quad \text{appelé tenseur hydrostatique}$$

avec $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$

et :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \bar{\sigma} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \bar{\sigma} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \bar{\sigma} \end{bmatrix} \quad \text{appelé tenseur déviateur.}$$

Nous allons maintenant essayer de délimiter le domaine d'élasticité qui constituera la toile de fond du présent travail.

En première constatation, le milieu poreux, non élastique pour des contraintes simples, le paraît pour des sollicitations alternatives.

Nous allons faire appel à la théorie de GASSMAN pour l'étude mathématique simplifiée. Cette théorie comprend la réversibilité des contraintes avec les déformations.

La linéarité entre les états correspondants de contrainte et de déformation pourra s'appliquer au milieu poreux pour de faibles oscillations autour d'un état initial.

Quand un état de tension p règne en tous les points d'un milieu, celui-ci se trouve dans un état de distorsion Φ .

Lorsque le tenseur de contraintes subit une variation ΔP , la distorsion varie de $\Delta \Phi$. Plaçons-nous en un point M et traçons un trièdre trirectangle constitué par les segments a_1, a_2, a_3 .

Lors du passage $\bar{\Phi} + \Delta \bar{\Phi}$, M se déplace en M' et les segments prennent une longueur et une orientation différentes de sorte que :

$$\Delta e_1 = \frac{a'_1 - a_1}{a_1} \quad ; \quad \Delta e_2 = \frac{a'_2 - a_2}{a_2}$$

$$\Delta e_3 = \frac{a'_3 - a_3}{a_3}$$

$$\Delta e_4 = \frac{\pi}{2} - \text{arc}(a'_2, a'_3) \quad ; \quad \Delta e_5 = \frac{\pi}{2} - \text{arc}(a'_3, a'_1),$$

$$\Delta e_6 = \frac{\pi}{2} - \text{arc}(a'_1, a'_2)$$

On introduit les coefficients C_{ij} pour établir la relation entre ΔP_i et Δe_j .

$$\Delta P_i = - \sum_{j=1}^{j=6} C_{ij} \cdot \Delta e_j \quad (i = 1, 2 \dots 6)$$

Le milieu se comportera de façon parfaitement élastique quand la relation linéaire précédente sera respectée, pour des valeurs ΔP_i suffisamment faibles mais arbitraires.

Les C_{ij} représentant des grandeurs indépendantes de Δe_j et ΔP_i , seront appelées constantes élastiques.

Quand dans un milieu la relation entre P et $\bar{\Phi}$ est univoque et réversible et après fixation d'un état arbitraire de départ $\bar{\Phi}$, les ΔP_i sont des fonctions univoques de Δe_j :

$$\Delta P_i = f_i (\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_6)$$

$$i = (1, 2, \dots, 6)$$

En développant en série de Taylor, on obtient :

$$\Delta P_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial \Delta e_j} \right)_{\Phi} \cdot \Delta e_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial \Delta e_2} \right)_{\Phi} \cdot \Delta e_2 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial \Delta e_6} \right)_{\Phi} \cdot \Delta e_6 \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f_i}{\partial \Delta e_1^2} \right)_{\Phi} \cdot (\Delta e_1)^2 + \text{etc} \dots$$

Pour des valeurs de Δe_j suffisamment faibles, on pourra se limiter aux termes linéaires du développement précédent.

Nous dirons que nous sommes en présence d'un corps à élasticité différentielle, du fait que les coefficients sont des différentielles.

$$\frac{\partial f_i}{\partial \Delta e_1}, \quad \frac{\partial f_i}{\partial \Delta e_2}, \quad \text{etc} \dots$$

Si ces coefficients sont des constantes, nous rejoignons la relation linéaire entre ΔP_i et Δe_j ; les C_{ij} sont des constantes du matériau et nous pouvons dire que celui-ci est parfaitement élastique.

Le milieu à élasticité différentielle est isotrope quand les constantes C_{ij} peuvent s'exprimer comme suit à l'aide de deux constantes :

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\nu$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \nu$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{21} = C_{31} = C_{32} = \lambda$$

Toutes les autres valeurs de C_{ij} sont nulles.

Délimitons un petit volume V dans le milieu, à l'état $\emptyset$. Lors du passage à l'état $\emptyset + \Delta \emptyset$ il subit un accroissement ΔV et on a la relation $\Delta P = - k \cdot \frac{\Delta V}{V}$ avec $k = \lambda + \frac{2}{3} \mu$

k est le module de compression, $\frac{1}{k}$ la compressibilité. Quand il existe entre V et p une relation univoque et réversible, il faut remplacer les grandeurs Δ par des différentielles, c'est-à-dire que :

$$k = - V \cdot \frac{dp}{dV}$$

Considérons un morceau cylindrique du milieu enfermé dans un récipient avec parois latérales rigides.

Soit a_1 la longueur du cylindre. On exerce sur les extrémités une pression supplémentaire ΔP_1 , réduisant la longueur du cylindre à a'_1 . L'allongement spécifique est :

$$\Delta e_1 = \frac{a'_1 - a_1}{a_1} = \frac{\Delta a_1}{a_1}$$

Soit M tel que :

$$M = - \frac{\Delta P_1}{\Delta e_1} = - a_1 \cdot \frac{\Delta P_1}{\Delta a_1}$$

M est un autre coefficient d'élasticité du milieu.

Quand il existe une relation univoque et réversible entre la pression P_1 suivant la direction x_1 et la longueur a_1 du cylindre, on a :

$$M = - a_1 \cdot \frac{dP_1}{da_1}$$

La relation entre M d'une part et λ et μ d'autre part résulte des

équations de l'élasticité. Quand la section du cylindre est sensiblement perpendiculaire aux faces parallèles, la contrainte par ΔP_1 crée des accroissements de pression ΔP_2 et ΔP_3 sur les surfaces latérales ; la rigidité des parois s'exprime par $\Delta e_2 = \Delta e_3 = 0$.

Les trois premières équations d'élasticité s'écrivent dans ce cas :

$$\Delta P_1 = - (\lambda + 2\nu) \Delta e_1$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_3 = - \lambda \cdot \Delta e_1$$

Il en résulte que $M = \lambda + 2\nu$. Cet essai de compression fournit simultanément les constantes M et λ quand on mesure les grandeurs ΔP_1 , ΔP_2 et Δe_1 .

Quand le milieu est un corps solide, on peut également faire l'essai de compression avec les faces latérales libres, c'est-à-dire avec la condition $\Delta P_2 = \Delta P_3 = 0$.

Les longueurs initiales a_2 et a_3 des côtés de la section rectangulaire s'allongent alors à a'_2 et a'_3

Cet essai de compression donne deux autres coefficients d'élasticité E et $\mathcal{D}$.

En posant à nouveau :

$$\Delta e_1 = \frac{a'_1 - a_1}{a_1} = \frac{\Delta a_1}{a_1} \quad \text{et} \quad \Delta e_2 = \frac{a'_2 - a_2}{a_2} = \frac{\Delta a_2}{a_2}$$

E et $\mathcal{D}$ sont définies par les équations :

$$E = - \frac{\Delta P_1}{\Delta e_1} = - a_1 \cdot \frac{\Delta P_1}{\Delta a_1} \quad \text{et} \quad \mathcal{D} = - \frac{\Delta e_2}{\Delta e_1} = - \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{\Delta a_2}{\Delta a_1}$$

E est le module d'élasticité ou module de YOUNG, ν la constante de POISSON.

En utilisant les équations d'élasticité on obtient :

$$E = \nu \cdot \frac{3\lambda + 2\nu}{\lambda + \nu} \quad \text{et} \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \nu)}$$

Deux quelconques des six coefficients d'élasticité E, k, M, λ , ν et ν d'un milieu isotrope à élasticité différentielle permettent de calculer les quatre autres.

C - DEFINITION DES COMPRESSIBILITES

Selon la nature de la modification de l'état de tension d'un milieu poreux, nous pouvons définir plusieurs types de compressibilité. Il est possible en effet de considérer en particulier le comportement du volume total seul (bulk volume), du volume de pores ou du volume solide.

Ces trois études de comportement de la roche étant de toute évidence liées, elles résultent de la déformation du squelette rocheux.

Nous pouvons dégager quatre causes essentielles de cette variation de structure se produisant sous l'action, soit de la pression de pores, soit de la pression extérieure.

- Déformation des grains.
- Déformation et tassement de la matière cimentant les grains.
- Variation de la répartition mutuelle des grains ou déplacement des grains individuels contenus dans la structure générale du squelette.

- Aplatissement des rugosités et cisaillement des saillies des grains.

Les coefficients de compressibilité suivants retiendront tout particulièrement notre attention.

a) Compressibilité solide

C'est la compressibilité de la matrice rocheuse. Elle se définit comme la variation du volume solide, rapportée à un volume de référence V_{s_0} , pour une variation unitaire uniforme de la pression.

$$C_s = \frac{1}{V_{s_0}} \cdot \left(\frac{dV_s}{d\sigma} \right)_{\sigma = p}$$

Pour un échantillon donné, ce coefficient est pratiquement une constante sur une très large gamme de pression.

b) Compressibilité de pores

Nous pouvons considérer deux types de compressibilité de pores, soit que l'on fasse varier la pression de pores p en gardant la contrainte externe σ constante, soit que l'on fasse varier σ avec p constante.

$$C_p = \frac{1}{V_{p_0}} \cdot \left(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma} \right)_{p = \text{cte}}$$

$$C'_p = \frac{1}{V_{p_0}} \cdot \left(\frac{\partial V_p}{\partial p} \right)_{\sigma = \text{cte}}$$

Il faut remarquer que ces deux coefficients seront de signe contraire, pour tenir compte du fait que des variations de même sens des grandeurs σ et p entraînent des variations de sens opposés du volume V_p .

Dans toute la suite du travail, nous respecterons les signes de variations du volume de pores.

De ce fait C_p sera négatif car une augmentation de σ provoquera une diminution de V_p ; par opposition, C'_p sera positif car une augmentation de p fera accroître le volume V_p .

c) Compressibilité totale (Bulk compressibility)

Sur le même modèle que la compressibilité de pores, nous pouvons distinguer deux types de compressibilité totale :

$$C_T = \frac{1}{V_{T_0}} \cdot \left(\frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \right)_p = \text{cte}$$

$$C'_T = \frac{1}{V_{T_0}} \cdot \left(\frac{\partial V_T}{\partial p} \right)_\sigma = \text{cte}$$

D - CORRELATIONS ENTRE LES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE EN CONDITIONS DE GISEMENT ET EN CONDITIONS DE LABORATOIRE

1) Détermination du coefficient global de compressibilité $\mathcal{C}$ d'un gisement en fonction des compressibilités et des saturations respectives de l'huile et de l'eau

J. BONFILS (2) a mis au point une méthode particulière d'évaluation de ce coefficient, compte tenu de la présence d'eau dans un gisement.

Considérons un volume poreux V_0 , à la pression P_0 , ayant une saturation en eau S_w et en huile $1 - S_w$.

Le coefficient de compressibilité du volume poreux s'exprime par :

$$C_p(p) = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial p}$$

Si nous intégrons cette expression de p_0 à p , nous écrirons :

$$V_p = V_0 \cdot e^{\int_{p_0}^p C_p(p) \cdot dp}$$

ou encore :

$$V_p = V_0 \cdot e^{(p - p_0) \cdot \beta_p}$$

si nous désignons par β_p la valeur moyenne de $C_p(p)$ dans l'intervalle (p_0, p) .

Le coefficient de récupération s'exprime par :

$$\frac{V_0 - V_p}{V_0} = 1 - e^{(p - p_0) \cdot \beta_p}$$

Le développement en série de cette expression jusqu'au 2e ordre donne :

$$\frac{V_0 - V_p}{V_0} = (p_0 - p) \beta_p - (p_0 - p)^2 \frac{\beta_p^2}{2!}$$

ou encore :

$$C_p = \beta_p - (p_0 - p) \frac{\beta_p^2}{2!}$$

Le coefficient de compressibilité de l'eau s'écrit :

$$C_w = - \frac{1}{V_w} \cdot \frac{\partial V_w}{\partial p}$$

et celui de l'huile :

$$c_h = - \frac{1}{V_h} \cdot \frac{\partial V_h}{\partial p}$$

En raisonnant comme précédemment, les volumes d'huile et d'eau à la pression p s'écrivent :

$$V_h = (1 - S_w) V_o \cdot e^{-(p - p_o)\beta_h}$$

et
$$V_w = S_w \cdot V_o \cdot e^{-(p - p_o)\beta_w}$$

Si l'on suppose que la production d'eau est quasiment nulle, on voit que la production d'huile s'évalue à :

$$V_h = (V_p - V_w)$$

et le coefficient de récupération s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{V_h = (V_p - V_w)}{V_h} &= \frac{(1 - S_w) e^{-(p - p_o)\beta_h} - \left[e^{(p - p_o)\beta_p} - S_w \cdot e^{-(p - p_o)\beta_w} \right]}{(1 - S_w) e^{-(p - p_o)\beta_h}} \\ &= \mathcal{C} \cdot (p_o - p) \end{aligned}$$

Si on développe en série le deuxième membre, et en reprenant les résultats précédents, on obtient l'expression de $\mathcal{C}$ en fonction des coefficients de compressibilité propres à chacun des éléments porés, huile et eau :

$$\mathcal{C} = c_h + \frac{c_p}{1 - S_w} + \frac{c_w \cdot S_w}{1 - S_w}$$

2) Compressibilités des milieux élastiques poreux

Soit un réservoir R_1 de forme quelconque, dont la paroi a une certaine épaisseur e du même ordre que les dimensions internes du réservoir. Ce dernier est rempli d'un fluide à une pression p et il est soumis à une contrainte de compression σ constante dans toutes les directions normales à ce réservoir.

La chute de pression du fluide contenu, obtenue par soutirage de celui-ci par exemple, va donner lieu à une variation du volume contenant, et par suite à une variation du volume solide et du volume total, ceci par modification de l'état des contraintes.

Supposons maintenant que nous ayons découpé le réservoir précédent dans un ensemble beaucoup plus grand et qui était constitué de la matière solide du réservoir. Nous avons donc un autre réservoir R_2 dont la paroi avait une épaisseur E que nous pouvons admettre infinie devant les dimensions internes de la cavité contenant le fluide. Si nous réalisons l'expérience précédente dans ce nouveau contexte, nous pouvons dire alors que le réservoir R_1 a ses parois encastrées et sa déformation sera différente de celle observée précédemment.

Nous avons considéré cette représentation simpliste pour fixer les idées. Le raisonnement portant sur un réservoir ayant une cavité unique peut s'étendre à un réservoir poreux. Nous pouvons très bien comparer le réservoir R_2 à un gisement pris dans le contexte du géosynclinal et le réservoir R_1 pourra aussi être comparé à un échantillon de roche étudié en laboratoire. Cette comparaison entre le gisement et un élément de roche exige nécessairement que le gisement et l'élément soient parfaitement homogènes et isotropes.

Donc la chute de pression du fluide donne lieu à une variation des volumes poreux, solide et total. Si la variation du volume de fluide avec la pression est habituellement connue par l'analyse P.V.T., par contre la variation du milieu poreux est rarement mesurée, étant considérée comme de minime importance en réservoir engineering.

Cependant de nombreux résultats expérimentaux sur la compressibilité des milieux poreux ont été publiés par CARPENTER et SPENCER (17), CASTEL et BARON (11), DOBRYNIN (18) et BONFELS (2), et ces résultats relatent que dans bon nombre de cas la négligence de cette variation de volume de pores introduit des erreurs dans les calculations de balance de matériel d'un réservoir.

Nous ne rappellerons pas la définition des compressibilités des roches ; retenons qu'il en existe trois types.

La tendance actuelle est de considérer que la compressibilité de pores d'un gisement est la moitié de celle constatée sur un échantillon de roche étudié en laboratoire.

Cette hypothèse provient d'un résultat théorique qu'a obtenu J. GEERTSMA en 1957 (13). Ce résultat, donné pour un réservoir de grés, appelle de nombreux commentaires ; c'est pourquoi nous allons reconsidérer les points essentiels de l'argumentation de GEERTSMA.

La variation de la contrainte externe due à la chute de pression de fluide dans un réservoir d'huile dépend des conditions limites du gisement que nous reprendrons par la suite.

Si l'on considère un élément de volume poreux homogène, isotrope, de matériau solide continu, on peut dire que les volumes V_p et V_T sont des fonctions uniquement de la contrainte externe supposée hydrostatique σ et de la pression p .

Ceci peut s'écrire :

$$dV_p = \left(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma} \right)_p d\sigma + \left(\frac{\partial V_p}{\partial p} \right)_\sigma dp \quad (1)$$

et

$$dV_T = \left(\frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \right)_p d\sigma + \left(\frac{\partial V_T}{\partial p} \right)_\sigma dp \quad (2)$$

Ces équations font partie de la théorie de BIOT dans laquelle n'est faite aucune hypothèse et qui, par conséquent, est très générale.

GEERTSMA va reprendre pratiquement cette théorie mais va la rendre beaucoup plus spécifique. Pour cela il introduit après les deux expressions précédentes, une hypothèse qui va être fondamentale dans toute la suite de ses résultats. Cette hypothèse, c'est l'invariance de la porosité lorsque $\sigma - p = \text{constante}$.

Si un milieu poreux est soumis à une contrainte externe σ et une pression de fluide p , et que l'on fasse varier ces paramètres tels que $d\sigma = dp$, GEERTSMA écrit que :

$$\frac{dV_p}{V_p} = \frac{dV_T}{V_T} = \frac{dV_s}{V_s}$$

Ce qui équivaut à dire que les trois coefficients de compressibilité C_p , C_s et C_T sont égaux.

Partant de là, et en reprenant les expressions précédentes, on peut écrire :

$$\frac{1}{V_p} \left(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma} \right)_p + \frac{1}{V_p} \left(\frac{\partial V_p}{\partial p} \right)_\sigma = \frac{1}{V_T} \left(\frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \right)_p + \frac{1}{V_T} \left(\frac{\partial V_T}{\partial p} \right)_\sigma = C_s \quad (3)$$

Il faut remarquer que l'on aurait pu écrire C_p ou C_T à la place de C_s . Les équations (1) et (2) peuvent s'écrire d'une autre façon si l'on fait intervenir l'élément différentiel $d\sigma - dp$.

Ainsi (1) s'écrit :

$$\frac{dV_P}{V_P} = \left(\frac{1}{V_P} \cdot \frac{\partial V_P}{\partial \sigma} + \frac{1}{V_P} \cdot \frac{\partial V_P}{\partial p} \right) dp + \frac{1}{V_P} \cdot \frac{\partial V_P}{\partial \sigma} (d\sigma - dp)$$

(1 bis)

De même pour (2) :

$$\frac{dV_T}{V_T} = \left(\frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p} + \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \right) dp + \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma} (d\sigma - dp)$$

(2 bis)

On peut définir un coefficient de compressibilité totale C_T correspondant à la variation du seul paramètre σ , p restant constant :

$$C_T = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma}$$

A l'aide de cette définition et de l'équation (3), l'équation (2 bis) s'écrit :

$$\frac{dV_T}{V_T} = C_S \cdot dp + C_T (d\sigma - dp) = C_T \cdot d\sigma - (C_T - C_S) dp \quad (4)$$

Or $\frac{dV_T}{V_T}$ s'écrit d'après (1) :

$$\frac{dV_T}{V_T} = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p} \cdot dp$$

Et en écrivant l'équivalence :

$$\frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p} \cdot dp \equiv C_T \cdot d\sigma - dp (C_T - C_s)$$

On déduit :

$$\frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p} = - (C_T - C_s)$$

Ensuite pour passer des variations du volume total aux variations du volume de pores, GEERTSMA utilise la réciproque du théorème de BETTI et RALEIGH, tiré d'un ouvrage de A.E. LOVE : "The mathematical theory of elasticity". La réciproque de ce théorème s'énonce ainsi :

"Le travail total produit par les forces résultant de $d\sigma$ agissant sur les déplacements produits par les forces résultant de dp , est égal au travail produit par les forces engendrées par dp agissant sur les déplacements produits par les forces engendrées par $d\sigma$ ".

Ce théorème permet d'écrire :

$$\frac{\partial V_T}{\partial p} = - \frac{\partial V_p}{\partial \sigma}$$

Ainsi l'équation (4) peut se transformer en :

$$\frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial \sigma} = C_T - C_s$$

Nous pouvons faire intervenir la porosité $\phi = \frac{V_p}{V_T}$

$$\frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial \sigma} = \frac{1}{\phi} (C_T - C_s)$$

Donc l'équation (1 bis) peut s'écrire :

$$\begin{aligned}\frac{dV_p}{V_p} &= C_s \cdot d_p + \frac{1}{\phi} (C_T - C_s) (d\sigma - dp) \\ &= \frac{1}{\phi} \left[C_T - (1 + \phi) C_s \right] d_p + \frac{1}{\phi} (C_T - C_s) d\sigma\end{aligned}$$

Conséquence sur la porosité :

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \Rightarrow \frac{d\phi}{\phi} = \frac{dV_p}{V_p} - \frac{dV_T}{V_T} \quad \text{ou} \quad d\phi = \phi \left(\frac{dV_p}{V_p} - \frac{dV_T}{V_T} \right)$$

Remplaçons $\frac{dV_p}{V_p}$ et $\frac{dV_T}{V_T}$ par les expressions précédentes :

$$d\phi = \phi \left[\frac{1}{\phi} (1 + \phi) C_s - C_T \right] d_p + \frac{1}{\phi} (C_T - C_s) d\sigma + (C_T - C_s) d_p - C_T \cdot d\sigma$$

$$\text{D'où } d\phi = C_T (d\sigma - dp) \left(1 - \phi - \frac{C_s}{C_T} \right)$$

$$\text{comme } d\phi = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{\partial \phi}{\partial p} \cdot dp$$

On obtient les dérivées partielles par équivalence :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = C_T \left(1 - \phi - \frac{C_s}{C_T} \right) = - \frac{\partial \phi}{\partial p}$$

Remarques :

Dans la relation (3), les deux nombres ont été écrits égaux à C_s , après avoir divisé par $d\sigma$, étant entendu que $d\sigma = dp$.

Ensuite dans les équations (1 bis) et (2 bis), on a remplacé le terme facteur de dp par C_s , alors que là on ne suppose plus $d\sigma = dp$. Ces approximations ne manquent pas de surprendre.

L'auteur de la théorie fait aussi des approximations en considérant tel ou tel type de roche. Il considère que le but est d'exprimer aussi simplement que possible la compressibilité qui peut correspondre à des types variés de sédiments rencontrés dans les réservoirs d'huile.

Aussi dans les grés consolidés, on peut conclure d'après les résultats expérimentaux que les déformations sont purement élastiques. Il apparaît aussi que pour des porosités supérieures à 15 % la compressibilité totale C_T est beaucoup plus grande que la compressibilité solide C_s et cette dernière peut être négligée devant C_T . Les formules approchées s'écrivent donc :

$$(4) \longrightarrow \frac{dV_T}{V_T} \simeq C_T (d\sigma - dp)$$

$$(5) \longrightarrow \frac{dV_P}{V_P} \simeq \frac{C_T}{\phi} (d\sigma - dp)$$

Remarque : ceci revient à dire que $dV_P = dV_T$

3) Comportements possibles d'un réservoir et conditions limites

Les conditions initiales sont définies par la distribution des contraintes aux parois du réservoir, lesquelles parois résultent des déformations dans le milieu géologique.

Comment peut se comporter un gisement lorsque l'on fait chuter la pression du fluide p ? Nous pouvons distinguer trois cas généraux :

A - La contrainte limite sur le réservoir est uniforme et constante.

$$d\sigma = 0$$

Ce cas représente la condition limite qui régit les expériences de laboratoire. Pour des grés, si l'on se reporte aux formules approchées de GEERTSMA, on trouve :

$$\frac{dV}{V} \frac{p}{p} = - \frac{C_T}{\emptyset} \cdot dp$$

B - La surface extérieure du réservoir est rigide.

Dans ce cas, il faut ouvrir une parenthèse sur les déformations élastiques du volume total et sur les déformations visqueuses.

Les déformations élastiques qui résultent des conditions de contraintes σ_1 , σ_2 , σ_3 dans les trois directions peuvent s'écrire :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \left[\sigma_1 - \frac{1}{\emptyset} (\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

ce qui équivaut à $\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \left[\frac{1+\emptyset}{\emptyset} \cdot \sigma_1 - \frac{1}{\emptyset} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right]$

où E est le module d'YOUNG et $\emptyset$ le coefficient de POISSON.

La variation de volume total est donnée par :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 3 \left[\frac{\emptyset - 2}{\emptyset \cdot E} \right] \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right]$$

mais aussi exprimée par :

$$\varepsilon = C_T \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$$

D'où la définition d'une déformation moyenne :

$$\varepsilon_m = \frac{1}{3} \cdot C_T \cdot \sigma_m \quad \text{si } \sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Dans ce cas on peut écrire :

$$\varepsilon_i - \varepsilon_m = \frac{\sigma_i - \sigma_m}{2 G_T} \quad (i = 1, 2, 3)$$

où G est le module de cisaillement de la roche

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i - \sigma_m}{2 G} + \varepsilon_m = \frac{\sigma_i - \sigma_m}{2 G_T} + \frac{1}{3} C_T \cdot \sigma$$

Par ailleurs les déformations résultant d'une pression interne peuvent s'écrire :

$$\varepsilon_i = -\frac{1}{3} (C_T - C_s) p \quad (i = 1, 2, 3)$$

La déformation totale est la somme des déformations précédentes :

$$\varepsilon_i = -\frac{1}{3} (C_T - C_s) p + \frac{\sigma_i - \sigma_m}{2 G_T} + \frac{1}{3} C_T \cdot \sigma$$

On peut également l'écrire :

$$\frac{dL_i}{L_i} = -\frac{1}{3} (C_T - C_s) dp + \frac{d\sigma_i - d\sigma}{2 G_T} + \frac{1}{3} C_T \cdot d\sigma$$

dans laquelle i représente la direction de la contrainte principale ($i = 1, 2, 3$), G_T le module de cisaillement de la roche et L_i la dimension du réservoir dans la direction i

En conséquence, si les déformations sont données, les valeurs de $d\sigma_i$ peuvent être calculées et $d\sigma$ est alors connue.

En général, deux constantes élastiques pour la roche poreuse, C_T et G_T ,

jouent un rôle dans la compressibilité du milieu poreux.

Les déformations élastiques peuvent être décrites en introduisant les viscosités volumiques. Cette procédure prouve l'analogie complète entre les équations élastiques et visqueuses ; la viscosité de cisaillement remplacera le module de cisaillement et la viscosité volumique le module de compression.

Aux déformations élastiques seront comparées les vitesses de déformations visqueuses.

En conséquence de l'analogie entre les équations des déformations élastiques et des écoulements visqueux, l'équation obtenue par GEERTSMA :

$$\frac{dV_p}{V_p} = C_s \cdot dp + \frac{1}{\phi} (C_T - C_s) (d\sigma - dp)$$

peut être transformée en une équation qui décrit la dérivée par rapport au temps de la variation du volume de pores due aux déformations visqueuses :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{dV_p}{V_p} \right] = - \frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{\xi_s} - \frac{1 + \phi}{\xi_s} \right) dp + \frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{\xi_T} - \frac{1}{\xi_s} \right) d\sigma$$

dans laquelle ξ_T et ξ_s sont respectivement les coefficients de viscosité de l'ensemble de la roche et de la matrice.

Pour le volume total, on pourrait donc écrire :

$$\frac{dV_T}{V_T} = - (C_T - C_s) dp + C_T \cdot d\sigma$$

$$\implies \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dV_T}{V_T} \right) = - \left(\frac{1}{\xi_T} - \frac{1}{\xi_s} \right) dp + \frac{1}{\xi_T} \cdot d\sigma$$

La vitesse de déformation visqueuse est l'analogue de la déformation totale :

$$\frac{dL_i}{L_i} = -\frac{1}{3} (C_T - C_s) dp + \frac{d\sigma_i - d\sigma}{2 G_T} + \frac{1}{3} C_T \cdot d\sigma$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dL_i}{L_i} \right) = -\frac{1}{3} \left(\frac{1}{\xi_T} - \frac{1}{\xi_s} \right) dp + \frac{d\sigma_i - d\sigma}{2 \mu_T} + \frac{d\sigma}{3 \xi_T}$$

μ_T représente la viscosité de cisaillement de l'ensemble de la roche.

Donc des différentes combinaisons de déformations élastiques et des temps de déformations visqueuses dépendront les relations de comportement visco-élastique.

Donc dans ce deuxième cas, on voit que trois constantes de viscosité sont suffisantes pour la description du comportement visqueux ; elles nous permettent de connaître le comportement limite de la contrainte , si l'on peut mesurer les ΔL_i .

C - La contrainte limite dans une des directions principales est constante et il n'y a pas de déformation dans les autres directions principales de contraintes.

Dans ce cas nous devons étudier la relation entre $d\sigma_m$ et dp dans les conditions de réservoir. Dans ce dernier, la contrainte limite verticale est constante et il n'y a pas de déformation du volume total dans les directions horizontales.

D'où $d\sigma_1 = 0$ et $d\sigma_2 = d\sigma_3 = d\sigma$

Donc la contrainte moyenne sera : $d\sigma_m = \frac{3}{2} d\sigma$

Alors si dp et $d\sigma$ sont fixés, le temps va agir en différentielle totale et les déformations totales dans les directions de contraintes principales seront données par la somme des équations élastiques et visqueuses :

$$\begin{aligned} \frac{dL_i}{L_i} = & -\frac{1}{3} \left(C_T + \frac{1}{\frac{d\xi_{sT}}{dt}} - C_s \right) dp + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_T} + \frac{1}{\frac{d\mu_T}{dt}} \right) (d\sigma_i - d\sigma_m) \\ & + \frac{1}{3} \left(C_T + \frac{1}{\frac{d\xi_{sT}}{dt}} \right) d\sigma_m \end{aligned}$$

Nous avons supposé que $\xi_s \rightarrow \infty$ ce qui est une approximation souvent légitime. Considérons le cas où nous n'avons pas de déformations dans la directions i :

$$\frac{dL_i}{L_i} = 0, \text{ d'où on tire } d\sigma_m \text{ en fonction de } dp :$$

$$d\sigma_m = \frac{C_T + \frac{1}{\frac{d\xi_{sT}}{dt}} - C_s}{\left(C_T + \frac{1}{\frac{d\xi_{sT}}{dt}} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{1}{G_T} + \frac{1}{\frac{d\mu_T}{dt}} \right)} \cdot dp$$

Dans le cas de grés, pour une contrainte uniaxiale constante et pour une paroi rigide, l'expression précédente peut être modifiée ; en

effet, dans les grés on considère que les déformations sont purement élastiques, donc :

$$\xi_T = \mu_T \longrightarrow \infty . \text{ On suppose de plus que } C_s \ll C_T .$$

D'autre part on a une relation entre G_T , C_T et δ_T :

$$G_T = \frac{3}{4} \cdot \frac{M_T}{G_T} \quad \text{où } M_T \text{ est une fonction de la constante élastique}$$

de POISSON, δ_T , pour le matériau constituant la roche :

$$M_T = \frac{2(\delta_T - 2)}{\delta_T + 1}$$

Donc $d\sigma$ en fonction de d_p s'écrira :

$$d\sigma = \frac{C_T}{C_T + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{G_T}} \cdot dp = \frac{1}{1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{C_T \cdot G_T}} \cdot dp = \frac{1}{1 + \frac{1}{M_T}} \cdot dp$$

Si l'on reprend la formule approchée :

$$\frac{dV_p}{V_p} \simeq \frac{C_T}{\emptyset} (d\sigma - dp)$$

on peut écrire :

$$\frac{dV_p}{V_p} \simeq - \frac{1}{1 + M_T} \cdot \frac{C_T}{\emptyset} \cdot dp$$

GEERTSMA prend pour $\frac{1}{1 + M_T}$ une valeur moyenne $\frac{1}{2}$

D'où le résultat fréquemment admis et utilisé :

$$\frac{dV_p}{V_p} \simeq - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_T}{\emptyset} \cdot dp$$

qui signifie que pour des grés de nature isotrope, la compressibilité de pores dans le réservoir sera la moitié de la valeur mesurée au laboratoire sous des pressions limites uniformes et constantes.

4) Contribution à l'étude de la théorie précédemment exposée

Nous avons constaté que cette théorie était menée à partir d'une hypothèse, à savoir l'invariance de la porosité lorsque $d\sigma = dp$. De plus, pour ne pas faire intervenir de coefficients supplémentaires indépendants (C_p à σ ou p constant), il a été utilisé la réciproque du théorème de BETTI et RALEIGH.

Nous pensons que la recherche d'une corrélation avec le gisement doit venir de l'expérience de laboratoire et qu'il est inutile d'avoir recours à des relations énergie - déformations du type de BETTI et RALEIGH.

C'est pourquoi nous avons défini cinq coefficients de compressibilité mesurables par l'expérience :

$$C_s = \frac{1}{V_s} \cdot \frac{dV_s}{dp}$$

$$C_T = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma}$$

$$C'_T = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p}$$

$$C_p = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial \sigma}$$

$$C'_p = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial p}$$

Si nous décomposons l'expérimentation en deux stades, c'est-à-dire un stade de "compression" ($dp = 0$) et un stade de "production" ($d\sigma = 0$), nous pourrions vérifier les relations suivantes :

$$dV_T = dV_p + dV_s$$

Soit :

$$C_T \cdot V_T = C_s \cdot V_s + C_p \cdot V_p \text{ ou } C_T = (1 - \phi) C_s + \phi \cdot C_p \text{ (compression)}$$

$$C'_T \cdot V_T = C_s \cdot V_s + C'_p \cdot V_p \text{ ou } C'_T = (1 - \phi) C_s + \phi \cdot C'_p \text{ (production)}$$

En reprenant les équations de BIOT :

$$\frac{dV_p}{V_p} = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{1}{V_p} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial p} \cdot dp$$

$$\frac{dV_T}{V_T} = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{1}{V_T} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial p} \cdot dp$$

On peut écrire :

$$\frac{dV_p}{V_p} = C_p \cdot d\sigma + C'_p \cdot dp$$

$$\frac{dV_T}{V_T} = C_T \cdot d\sigma + C'_T \cdot dp$$

Influence sur la porosité :

$$d\phi = \phi \left(\frac{dV_p}{V_p} - \frac{dV_T}{V_T} \right)$$

$$d\phi = \phi \left[(C_p - C_T) d\sigma + (C'_p - C'_T) dp \right]$$

Comme ϕ est fonction de seulement σ et p :

$$d\phi = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{\partial \phi}{\partial p} \cdot dp$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = \phi (C_p - C_T)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = \phi (C'_p - C'_T)$$

Considérons maintenant les 3 cas les plus probables de comportement d'un gisement.

$$A - d\sigma = 0$$

Dans ce cas le coefficient de compressibilité de pores du gisement sera celui mesuré au laboratoire C'_p , et nous pourrons écrire :

$$\frac{dV_p}{V_p} = C'_p \cdot dp$$

B - Parois du réservoir rigides.

Dans ce cas, la variation relative de dimension dans une direction donnée et due à la chute de pression p sera donnée par :

$$(\mathcal{E}_i)_p = \frac{1}{3} C'_T \cdot dp$$

La déformation totale dans cette direction sera alors :

$$\mathcal{E}_i = \frac{1}{3} C'_T \cdot dp + \frac{\sigma_i - \sigma_m}{2 G_T} + \frac{1}{3} C_T \cdot d\sigma$$

En considérant comme valable et applicable au milieu poreux l'analogie entre déformation et vitesse de déformation, on pourra déduire de l'expression précédente l'expression de comportement visco-élastique :

$$\frac{d \xi_i}{dt} = \frac{1}{3} \cdot \frac{dp}{\xi'_T} + \frac{d\sigma_i - d\sigma_m}{2\mu_T} + \frac{d\sigma}{3\xi_T}$$

Donc si l'on peut mesurer les ξ_i dans le gisement, il suffit de trois constantes mesurées au laboratoire pour se rendre compte du comportement limite de la contrainte σ .

- C - La contrainte limite dans une des directions principales est constante et il n'y a pas de déformation totale dans les autres directions principales de contraintes.

La déformation totale dans une direction principale étant notée :

$$\xi_i = \frac{1}{3} \left(C'_T + \frac{1}{d\xi'_T} \right) dp + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_T} + \frac{1}{d\mu_T} \right) (d\sigma_i - d\sigma_m) + \frac{1}{3} C_T + \frac{1}{d\xi_T} d\sigma$$

Pour une déformation nulle on tire :

$$d\sigma_m = \frac{C'_T + \frac{1}{d\xi'_T}}{C_T + \frac{1}{d\xi_T} + \frac{3}{4} \left(\frac{1}{G_T} + \frac{1}{d\mu_T} \right)} \cdot dp$$

Cet élément peut aussi s'écrire :

$$d\sigma = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\delta_T - 2)}{(\delta_T - 1)} \cdot dp$$

Ce troisième cas est le plus fréquent rencontré dans les gisements ; nous pouvons considérer le comportement du volume de pores à partir des expressions précédentes :

$$\frac{dV_p}{V_p} = C_p \cdot d\sigma + C'_p \cdot dp$$

$$\Longleftrightarrow \frac{dV_p}{V_p} = \left[\frac{2}{3} \cdot C_p \cdot \left(\frac{\bar{\gamma}_T - 2}{\bar{\gamma}_T - 1} \right) + C'_p \right] dp$$

En conclusion nous pourrions dire que cette étude permet de concevoir l'importance de l'extension des résultats de laboratoire au gisement ; toutefois, une étude mécanique de celui-ci est nécessaire pour connaître les conditions aux limites. 3 cas se présentent, qui sont les plus probables. Dans chaque cas, la corrélation entre les mesures de laboratoire et le gisement peut être établie, soit directement (cas n° 1), soit en faisant appel à la théorie visco-élastique, et à l'analogie déformation - vitesse de déformation (cas n° 2 et 3). Nous avons abandonné les hypothèses de GEERTSMA qui, si elles réduisaient le nombre de paramètres, n'en étaient pas moins en litige avec la réalité physique.

E - DETERMINATION DE LA REPARTITION DES CONTRAINTES DANS UN GISEMENT

Les cas possibles de comportement d'un gisement que nous venons d'étudier précédemment n'en restent pas moins des cas idéaux. La transposition entre les données de l'expérience et le phénomène naturel est délicate.

Sans parler des échelles de temps totalement différentes dans les deux

cas, il est clair que si p est généralement connu avec une bonne précision, on n'a que très peu de connaissance sur la distribution des contraintes dans le terrain (effets de voûte, failles, etc ...) et de leurs modifications dans le temps.

Certains auteurs ont essayé de mettre au point des méthodes d'évaluation de ces contraintes.

Nous citerons BYERLEE (19) qui étudie plus exactement la contrainte effective et tente d'en dégager une loi de variation.

Nous retiendrons les travaux très intéressants de FERTL et TIMKO (20) qui déterminent les pressions géostatiques à partir de diagraphies, c'est-à-dire des enregistrements en fonction de la profondeur de paramètres caractéristiques de la formation traversée par le forage. Les types de diagraphies qu'ils utilisent sont :

- les diagraphies électriques, telles la courbe de polarisation spontanée, conductivité par induction, etc ...
- les mesures acoustiques.
- les mesures de densité apparente.
- les mesures par diagraphies de neutrons et impulsions de neutrons.

Enfin nous mentionnerons l'étude de LE TIRANT (21) qui aboutit à une estimation des contraintes in situ à partir des résultats de fracturation hydraulique.

F - MOBILITE STATIQUE ET DYNAMIQUE DU LIQUIDE SATURANT LES PORES D'UNE ROCHE

Cette théorie pourra trouver son application dans les mesures de vitesse des ultra-sons qui seront réalisées expérimentalement (22).

1) Vibration d'un fluide visqueux

Soit un milieu semi-infini visqueux, surmonté d'une paroi rigide qui oscille avec la pulsation ω ; soit V le déplacement dans la direction x ; l'équation du mouvement est :

$$\rho \cdot \frac{\partial V}{\partial t} = \mu \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$$

Si nous cherchons une solution de la forme $V = e^{i\omega t}$, nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{i \cdot \omega \cdot \rho \cdot V}{\mu}$$

D'où $V = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x}$

avec $\gamma = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2\mu}} \cdot (1 + i)$

Faisons $B = 0 \Rightarrow V = A \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2\mu}} \cdot x} \cdot \cos(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2\mu}} \cdot x)$

A la paroi ($x = 0$) nous avons $V = A \cos \omega t$.

Si nous cherchons $\mu \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$ à la paroi, c'est-à-dire la force de frottement solide - liquide, nous avons :

$$\mu \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2\mu}} \cdot (-\cos \omega t + \sin \omega t)$$

soit un terme en phase et un terme en quadrature avec la vitesse.

2) Généralités

Si nous considérons un faisceau parallèle de trous cylindriques de rayon r formant une porosité φ dans un milieu solide, la loi de POISEUILLE (écoulement laminaire à profil parabolique) donne une forme simplifiée de la loi de DARCY :

$$q = - \frac{\varphi \cdot r^2}{8 \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad q \text{ étant le débit par unité de surface.}$$

Si nous prenons maintenant un milieu poreux réel défini par un rayon moyen $\bar{r}$ des pores et une tortuosité τ , l'expression précédente devient :

$$q = - \frac{\varphi}{\tau} \cdot \frac{\bar{r}^2}{8 \mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

S'il s'agit maintenant d'oscillations rapides, le caractère de l'écoulement est complètement modifié : seules les couches de liquide voisines des parois des pores sont affectées par celles-ci, alors que les couches intérieures oscillent librement, leur vitesse ne dépendant que de leur masse.

La solution de HELMOLTZ, adaptée à ce problème, est alors :

$$q = - \frac{\varphi \cdot \bar{r}}{2 \tau \sqrt{\mu \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_f}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que l'épaisseur de liquide influencée par le solide est de l'ordre de $\sqrt{\frac{\mu}{2 \pi \cdot f \cdot \rho_f}}$; la nature de l'écoulement dépend donc de la position de cette longueur par rapport à $\bar{r}$:

$$\sqrt{\frac{\mu}{2 \pi f \cdot \rho_f}} \ll \bar{r}$$

écoulement laminaire

$$\sqrt{\frac{\mu}{2 \pi f \cdot \rho_f}} \gg \bar{r}$$

écoulement de HELMOLTZ

On peut écrire un nombre sans dimension, analogue au nombre de REYNOLDS :

$$\frac{\bar{r}^2 \cdot 2 \pi f \cdot \rho_f}{\mu} = 8 \tau \cdot \frac{2 \pi k \cdot \rho_f \cdot f}{\mu \cdot \varphi} = 8 \tau \cdot \frac{f}{\bar{r} c}$$

En appelant fréquence caractéristique la quantité $f_c = \frac{\mu \cdot \varphi}{2\pi k \cdot \rho_f}$

Comme ζ est de l'ordre de 3 pour les roches sédimentaires, on peut donc dire :

si $\frac{f}{f_c} \ll 1 \rightarrow$ problème B.F. $\rightarrow$ loi de POISEUILLE

$\frac{f}{f_c} \gg 1 \rightarrow$ problème H.F. $\rightarrow$ loi de HELMOLTZ.

G - REMARQUES SUR LA THEORIE DES ECOULEMENTS DE FILTRATION, par SCHNEEBELI (23)

1) Limites de validité de la loi de DARCY

On sait que la loi de DARCY cesse d'être valable lorsque le nombre de REYNOLDS de l'écoulement excède une valeur limite R_1 , mais, jusqu'à présent l'accord ne semble pas être fait entre les hydrauliciens en ce qui concerne la nature du seuil de validité de cette loi. L'opinion la plus couramment répandue à ce sujet fait coïncider ce seuil de validité avec l'apparition de la turbulence.

On peut objecter à cette théorie que, dans un écoulement strictement laminaire dans des petits canaux de section très variable, les effets d'inertie sont importants dès que la vitesse augmente et que ses effets suffisent à expliquer la non validité de la loi de DARCY. L'inertie introduit deux sortes de pertes de charges complémentaires : d'abord des pertes de charge variant avec le carré de la vitesse aux élargissements brusques des canaux intersticiels.

Ensuite, des pertes de charge dues à la déformation de la répartition des vitesses dans une section d'écoulement par rapport à celle qui s'établirait en régime uniforme.

Par ailleurs, la comparaison des nombres de REYNOLDS qui caractérisent l'apparition de la turbulence dans des conduites et de ceux qui correspondent à la limite de validité de la loi de DARCY semble montrer que cette dernière cesse d'être valable bien avant que la turbulence n'intervienne.

On peut énoncer les deux conditions caractérisant le régime de DARCY, à savoir :

- que l'écoulement doit être laminaire.
- que les effets d'inertie doivent être négligeables.

Il ne reste donc guère qu'à rechercher laquelle de ces deux conditions se trouve être la première en défaut lorsque le nombre de REYNOLDS augmente.

Théoriquement, c'est sans conteste la seconde, puisque, pour que les effets d'inertie soient rigoureusement négligeables, il faudrait que le nombre de REYNOLDS soit nul, mais il se peut qu'une déviation sensible de la loi de DARCY ne se manifeste que lorsque la turbulence apparaît.

2) Tentative de justification de la forme tensorielle de la loi de DARCY dans le cas d'un milieu pulvérulent homogène

Considérons un écoulement caractérisé par une charge moyenne et une vitesse de filtration (débit). Cette vitesse peut comme la vitesse réelle, se décomposer en composantes et jouit des propriétés d'un vecteur :

$$\vec{q} (q_x, q_y, q_z)$$

Si on veut associer un vecteur vitesse de filtration à chaque point de l'écoulement, il est évident que la surface unité figurant dans

la définition de cette vitesse doit être infiniment petite, de sorte que l'on puisse écrire :

$$q = \frac{dQ}{d\Omega}$$

Or, la définition précédente n'a de sens que si la surface infiniment petite $d\Omega$ contient un très grand nombre de grains formant le milieu poreux.

L'écoulement réel est régi par les équations de NAVIER dans lesquelles on néglige les termes d'inertie et qui, sous cette forme, satisfont aux deux conditions caractérisant le régime de DARCY. Elles peuvent s'écrire :

$$\rho \cdot g \cdot \frac{\partial h}{\partial (x, y, z)} = \eta \cdot \Delta (u, v, w)$$

ρ et η sont respectivement la masse spécifique et la viscosité dynamique du liquide, g l'accélération de la pesanteur et Δ le symbole de l'opérateur de LAPLACE.

Il faut ajouter une condition, pour décrire entièrement l'écoulement, c'est l'équation de continuité qui exprime l'incompressibilité du liquide :

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0$$

En décrivant les équations de NAVIER par rapport à x, y, z et en tenant compte de la condition précédente, on trouve :

$$\Delta h = 0$$

La charge hydraulique est un potentiel harmonique et ne dépendra donc que des conditions imposées aux limites de l'écoulement et de la configuration de l'espace occupé par le fluide.

SCHNEEBELI étudie ensuite l'écoulement fictif dans un milieu stratifié et apporte des remarques sur la nature tensorielle de la perméabilité.

En conclusion, pour les milieux pulvérulents homogènes, la loi de DARCY généralisée fait intervenir un tenseur symétrique. Mais cette loi n'est valable que dans certaines conditions. Une première limite de validité est d'ordre physique. Le critère qu'elle fait intervenir est le nombre de REYNOLDS. La seconde limite est une question d'échelle. La loi de DARCY n'est valable que lorsque l'écoulement laminaire qui se fait entre les grains est pratiquement uniforme en moyenne dans un petit volume élémentaire, infiniment petit par rapport à l'écoulement fictif, mais dont les dimensions sont grandes par rapport à celles des grains.

Dans les milieux stratifiés, tels que ceux que l'on rencontre souvent dans la nature, il suffit de choisir assez grande l'échelle de l'écoulement fictif considéré pour définir une perméabilité anisotrope moyenne qui est également un tenseur symétrique.

C H A P I T R E I I

INSTALLATIONS E T EXPERIMENTATIONS REALISEES

A - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION - RECONSTITUTION DES CONDITIONS DE GISEMENT

Dans cette partie nous allons exposer aussi complètement que possible les particularités des composants de l'installation ainsi que leurs possibilités.

Cette installation doit répondre aux buts suivants :

- Recréer autour de l'échantillon les conditions de pression et de température qui régnaient à la côte correspondante dans le gisement et faire varier ces conditions.
- Déterminer la variation du volume des pores.
- Permettre un écoulement et déterminer les perméabilités et leur variation.
- Assurer des isolations électriques locales dans le but de mesurer les variations de conductibilité de la roche saturée en électrolyte, ainsi que les vitesses d'ondes acoustiques.
- Permettre les mesures de déformation de l'échantillon.
- Enfin, les expériences devront conserver assez de souplesse et de rapidité pour en permettre aussi facilement que possible la multiplication et la facilité d'exécution.

1) Cellule porte-échantillons

La figure 1 reproduit le plan de l'ensemble de cette cellule monté.

Réalisée en acier inoxydable, elle peut supporter une pression interne maxima de 1200 kg/cm^2 . La longueur utile est supérieure à 300 mm et le diamètre intérieur voisin de 100 mm.

L'étanchéité d'ensemble est due aux deux joints de Téflon (rep. 13 et 14) qui, sous l'effet des poussées transmises par

les pistons (rep. 8 et 12) viennent s'écraser sur les portées parfaitement lisses des presse-joint (rep. 15 et 16).

Deux bouchons filetés (rep. 4) rendent ce système solidaire du corps et encaissent l'effort de poussée.

Au travers des pistons (rep. 8 et 12), deux tubings soudés chacun à un diffuseur (rep. 5 et 10) assurent la communication avec l'extérieur. L'un des tubings est recouvert de matière isolante et assure au diffuseur (rep. 5) une isolation électrique de l'ensemble de la cellule. Entre chaque diffuseur et les pistons, nous placerons des entretoises en caoutchouc dur, ceci afin d'assurer l'intermédiaire du contact entre piston et diffuseur en présence d'échantillons de diverses longueurs. Pour faciliter le montage ou la récupération de l'échantillon, la cellule est placée sur un support, réglable en hauteur par un vérin à air comprimé et un axe de rotation permet, en outre, de lui donner une inclinaison quelconque dans un plan vertical (voir photos hors texte).

Considérons maintenant le positionnement de l'échantillon. Celui-ci est de forme cylindrique et de diamètre égal à celui des diffuseurs. Il est placé dans un manchon de nitrille acrylique. Les diffuseurs qui viennent au contact de la roche ainsi que les entretoises et pistons placés en série s'engagent également dans ce manchon. L'étanchéité entre intérieur et extérieur de celui-ci est assurée par des joints toriques en Vitton.

Quatre contacts (rep. 29) métalliques viennent épouser une portion de la surface de la roche dans son plan médian. Ces contacts sont placés dans des logements du manchon, situés sur les extrémités de deux diamètres perpendiculaires. Pour des raisons de montage d'ensemble, ces logements sont décalés par rapport au plan médian du manchon de caoutchouc.

En regard des contacts sont prévus des alésages dans le corps de la cellule ainsi qu'un filetage destiné à recevoir un raccord (rep. 26).

Au travers de ce raccord passe une tige (rep. 25) qui vient se visser sur le contact. Cette tige est recouverte d'une pellicule d'alumine qui assure son isolation électrique du corps de la cellule. Ce montage permet, comme nous le verrons par la suite, de transmettre à l'extérieur de la cellule les déformations de deux diamètres perpendiculaires du plan médian de la roche étudiée.

L'étanchéité à ce niveau entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule est également assurée par des joints toriques en Vitton.

Considérons maintenant les possibilités de mise sous contraintes de la roche étudiée. Nous avons vu dans un premier temps que lors du positionnement de l'échantillon, celui-ci se trouvait isolé de l'intérieur de la cellule et en communication avec l'extérieur au moyen des diffuseurs et des tubings associés. Nous pourrions donc, à partir de ces tubings, réaliser diverses opérations, soit les connecter à une pompe à vide, soit y faire circuler un fluide, soit les relier à une pompe volumétrique ou tout simplement les isoler au moyen d'une vanne. Par conséquent nous aurons la possibilité de faire écouler un fluide au travers de la roche ou d'y maintenir une pression voulue du fluide saturant.

Etudions comment appliquer une pression externe à la roche. L'espace compris entre le manchon et la cellule est occupé par un fluide. Nous avons choisi en particulier l'huile de vaseline pour sa faible conductivité électrique ainsi que pour l'inexistence de sa corrosion à l'égard des métaux.

Un raccord et un alésage au travers du corps de la cellule permettent de relier cette huile à une pompe d'injection et de fixer la pression désirée. Nous réalisons ainsi la possibilité de créer une contrainte omnilatérale de confinement.

Pour fixer une contrainte axiale, nous avons eu recours à un piston (rep. 11). Au moyen d'un raccord (rep. 17) nous injectons de l'huile de vaseline et fixons la pression voulue. La contrainte se transmet axialement au piston (rep. 11), du piston au diffuseur (rep. 10), du diffuseur à la roche. Le diffuseur (rep. 5) assure la réaction à cet effort.

2) Dispositif d'expérimentations

a) La thermostatisation

La reconstitution des conditions de gisement s'accompagne de la nécessité de reproduire la température de la profondeur d'où a été extrait l'échantillon. Nécessité s'impose également que les fluides saturant la roche soient à cette même température.

Bien qu'une grande partie des expériences que nous trouvons dans la bibliographie ait été réalisée à la température ambiante, nous montrerons par la suite l'importance de ce paramètre dans les mesures de compressibilité.

Du fait que l'on mesure de très faibles variations de volume de liquide (eau salée) au cours des expériences de compressibilité, et qu'une bonne précision est recherchée, il importe de ne pas ajouter d'erreur due à la fluctuation de température.

Nous avons été amenés à étudier divers procédés de régulation dont certains étaient très coûteux et ne donnaient pas satisfaction pour autant. C'est une étuve qui a été retenue en définitive. Celle-ci est représentée dans la figure 2 par un cadre en double trait pointillé. Elle englobe la cellule ainsi que tout le circuit contenant l'eau salée devant saturer l'échantillon.

La température est régulée par tout ou rien grâce à un thermomètre à contact associé à la bobine d'un contacteur.

Un thermocouple traverse la cellule grâce à un raccord et vient tester la température sur le manchon entourant la roche. Nous avons noté une fluctuation qui n'excédait pas le dixième de degré et qui rend donc négligeables les dilatations de la roche ainsi que du liquide saturant.

Comme nous le voyons sur une photo des pages suivantes, les manomètres sont extérieurs à l'étuve. Le volume interne du tube de Bourdon n'étant pas négligeable devant le volume avec lequel il est en série, cela a nécessité de les thermostatier. Cette opération s'est effectuée à l'aide de sèche-cheveux commandés par un thyristor.

Pour éviter toute influence de variations de la température ambiante, les tubings de liaison cellule-manomètres ont été enrubannés d'amiante.

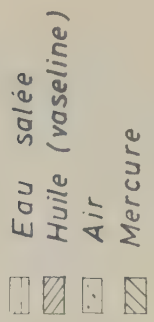
b) Circuits

En considérant le schéma du dispositif général, nous voyons apparaître deux circuits bien distincts :

- circuit de mise sous contrainte
- circuit d'injection et de drainage du fluide saturant.

Ces circuits sont reliés en amont à une même pompe, mais peuvent être utilisés indépendamment.

Le premier se dédouble au niveau de la vanne D, ce qui permet d'agir séparément soit sur la contrainte latérale soit sur la contrainte axiale à l'échantillon. Dans les deux cas, les tubings sont raccordés à deux manomètres.



Compressibilité en conditions de gisement.
. Dispositif.

10-12-70

S.N.P.A

DELOS

Ce circuit est saturé en huile de vaseline. Ce liquide a été choisi essentiellement pour sa faible viscosité en température, l'inexistence de la corrosion à l'égard des métaux utilisés et enfin sa très bonne isolation électrique. Cette dernière propriété se justifie lors des mesures de la résistivité de l'échantillon ; en effet les contacts (rep. 29) doivent rester isolés électriquement entre eux.

Le deuxième circuit doit répondre aux exigences suivantes :

- Réalisation du vide dans l'échantillon.
- Saturation de l'échantillon et mesure de la porosité initiale.
- Possibilité de réaliser un écoulement liquide ou gazeux.
- Possibilité de mesurer les variations du volume de pores de l'échantillon lorsqu'on fait varier sur celui-ci l'état de contrainte.

Ce circuit est relié en amont à la pompe volumétrique à débit constant que nous décrivons par la suite.

Il est constitué ensuite d'une cellule de transfert (rep. C) d'une capacité de 485 cc dont la pression de service peut atteindre 800 bars. Cette cellule, placée dans l'étuve, assure le passage mercure-fluide saturant.

Nous avons choisi pour fluide saturant de l'eau salée à 50 g/litre de chlorure de sodium. A cette eau, nous avons ajouté de l'aldéhyde formique, afin d'éviter toute formation microbienne pouvant aller dans certains cas jusqu'à colmater un échantillon poreux.

Dans toutes les expériences qui vont suivre, nous utilisons toujours ce même fluide.

La salinité de 50 g/litre a été choisie pour deux raisons :

- A cette concentration, l'eau salée possède la même compressibilité que l'eau distillée.

- D'autre part cette concentration est suffisante pour diminuer les interactions de l'eau avec les argiles pouvant être présentes dans la roche.

La cellule de transfert (rep. C) est limitée par trois vannes K, L et M, qui permettent de l'isoler pour effectuer son remplissage. Ainsi le reste du circuit peut rester en pression pendant cette opération.

Nous trouvons ensuite une vanne I, sur laquelle peut être raccordée soit une pompe à vide, soit un manomètre.

Plus loin nous rencontrons la vanne G qui constitue une dérivation sur une petite pompe volumétrique ou un générateur d'air comprimé. Cette vanne peut à l'occasion servir à fermer l'entrée de l'eau salée dans l'échantillon.

Le couple de vannes H et J permet de mettre en circuit la pompe ou l'air comprimé.

Cet air comprimé provient d'une station de compresseurs et peut être fixé à n'importe quelle pression entre 0 et 250 bars.

Quant à la petite pompe, c'est elle qui permet de mesurer les variations de volume de pores en pression et température. Réalisée en acier inoxydable, elle comporte une graduation dont chaque division représente le mm^3 . Testée à une pression de 800 bars et en mesurant le volume réel continu, elle a montré une déformation volumique pratiquement nulle.

En continuant la progression du circuit, nous traversons la roche et en aval de celle-ci nous trouvons une vanne A qui relie le circuit à un manomètre 0 - 1000 bars. Ce dernier peut d'ailleurs être isolé au moyen de cette vanne A.

Enfin nous arrivons à la vanne B qui termine ce circuit et permet de fermer sa sortie.

B - EXPERIMENTATIONS REALISEES

1) Saturation de l'échantillon

Une fois l'ensemble monté, la première opération à réaliser est de saturer l'échantillon en eau salée. Il faut noter que si l'on veut faire une mesure de perméabilité à l'air, cette expérience doit se faire bien entendu avant de saturer la roche en liquide. Mais nous préférons en faire une description dans le paragraphe concernant la perméabilité.

Donc, pour effectuer une saturation en eau salée, il faut au préalable réaliser le vide dans les pores de la roche. Nous disposons pour cela d'une pompe comprenant un double étage primaire et un ensemble secondaire à diffusion d'huile.

Les vannes J et K étant fermées, nous pouvons brancher la pompe au niveau des vannes B et I et amorcer le vide aux extrémités amont et aval de l'échantillon, ainsi que dans la partie de circuit comprise de la vanne B jusqu'à la vanne K.

Le matériel de raccorderie utilisé étant conçu spécialement pour des pressions relativement élevées, celui-ci se prête assez mal à un vide poussé. Les mesures de vide constatées n'ont pas été inférieures à 0,05 mm de mercure. Toutefois l'eau contenue dans la cellule C a toujours été au préalable avant son injection dans la roche fortement dégazée sous vide et nous sommes en droit d'assurer qu'elle peut dissoudre entièrement les molécules d'air persistantes. De là il peut être conclu que la saturation en eau de l'échantillon atteint 100 %.

2) Mesures des perméabilités en fonction de la contrainte σ et de la pression p

Les circuits ainsi que l'échantillon étant saturés et portés à la température désirée, le premier type de mesures va concerner les variations de perméabilité en fonction de l'état des contraintes. Celles qui vont influencer sur ce paramètre sont la contrainte externe omnilatérale σ d'une part, et la pression de pores p d'autre part.

L'intérêt est de décomposer les expériences en deux stades :

- Mesures de la perméabilité en fonction de σ
- Mesures de la perméabilité en fonction de p.

Dans les deux cas l'écoulement est provoqué par la pompe volumétrique à débit constant. L'eau salée issue de la cellule C circule dans la roche pour ressortir à la pression atmosphérique au niveau de la vanne B. Cette pompe permet une autonomie de 250 CC.

C'est donc le débit Q qui est imposé et si son manomètre a été au préalable relié à la vanne I, la différence de pression Δp peut être lue entre amont et aval de la carotte. Ces deux paramètres permettent de calculer la perméabilité qui a été définie dans l'introduction de ce travail comme étant la facilité avec laquelle un milieu poreux se laisse traverser par un fluide. Elle s'exprime par K, coefficient de perte de charge, tiré de la formule de Darcy :

$$Q = K \cdot \frac{S}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

S étant la section de l'échantillon en cm^2 , η la viscosité du fluide saturant en centipoises, L la longueur de l'échantillon

en cm, si Q est exprimé en cc par seconde, et ΔP en atmosphères, K sera exprimé en millidarcys.

La loi de Darcy présuppose l'existence d'un régime laminaire permanent, c'est-à-dire d'un régime dynamiquement stable, dans lequel en tout point, le vecteur vitesse garde un support, une orientation et une grandeur constants. Dans ces conditions, une particule fluide suit le trajet parfaitement déterminé d'une ligne de courant.

MONICARD (23) a tenté d'exprimer les conditions à respecter pour assurer la validité de la loi de Darcy. En prenant comme modèle de pores une succession de troncs de cône, et en fixant des conditions limites, il aboutit à l'expression :

$$\frac{u \cdot Q_m}{\mu \cdot S} < 0,01$$

Dans cette expression u est homogène à une longueur et est appelé "paramètre de forme". Q_m est le débit massique d'un fluide de viscosité μ traversant un échantillon de section S.

Les unités sont exprimées dans le système CGS. Q_m sera donné en grammes par seconde, μ en poises, S en cm^2 .

Nous adoptons dans ce travail cette condition limite et prenons pour u la valeur fréquemment mesurée :

$$u = 2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$$

Dans le cas de la mesure de perméabilité en fonction de σ , la pression aval de l'échantillon est égale à la pression atmosphérique.

Dans le cas de la mesure de perméabilité en fonction de P , la contrainte externe σ est fixée égale à celle régnant dans le gisement à la côte déterminée. Ensuite plusieurs écoulements sont effectués pour des pressions de pores moyennes différentes.

Pour maintenir ces pressions moyennes à l'intérieur de la roche, nous avons eu recours à un régulateur de pression placé après la vanne B. Cet appareil permet de réaliser un laminage de l'écoulement.

Ce qui a été décrit concerne les perméabilités liquides à l'eau salée. Le même principe d'expérience peut être conservé pour les perméabilités à l'air.

Dans ce cas l'essai doit bien entendu être réalisé avant la saturation de l'échantillon en eau salée. La cellule C est isolée du circuit en fermant la vanne K.

En ouvrant la vanne J on met en communication l'amont de l'échantillon avec un détendeur d'air comprimé. Il est ainsi possible de fixer la pression d'entrée. La pression de sortie peut être par exemple la pression atmosphérique. La mesure à réaliser est alors celle du débit. Pour cela nous avons recours à un débitmètre à lame de savon. Il suffit de mesurer le temps de montée d'une bulle de savon dans un tube gradué en volume.

Il faut remarquer que l'air, avant de traverser la roche, circule dans un serpentin de cuivre afin d'y être préchauffé.

3) Mesures des coefficients de compressibilité de pores en fonction de la contrainte σ et de la pression p

Nous avons défini deux types de coefficients de compressibilité de pores selon que l'on fasse varier la contrainte externe σ en gardant la pression du fluide p constante ou que σ restant constante, on fasse varier p .

Le premier essai consiste à comprimer la roche ; nous l'appellerons essai de "compression".

Le deuxième essai se rapproche des conditions de production d'un gisement ; nous l'appellerons essai de "production".

Dans ces expériences, il s'agit de mesurer les variations du volume de pores lors d'une modification de l'état des contraintes σ ou p . Ces mesures seront réalisées grâce à la petite pompe volumétrique placée en parallèle sur le circuit.

a) Essai de compression

La roche étant saturée en eau salée, nous fixons un état de contrainte correspondant à une contrainte externe σ_0 et une pression de pores p_0 . Cette dernière pression est lue sur le manomètre relié à l'aval de l'échantillon.

Une fois cette opération réalisée, la roche et une partie du circuit sont isolés en fermant les vannes B et K.

Si l'on augmente la contrainte σ d'une valeur $d\sigma$, le volume de pores va avoir tendance à diminuer. Le liquide contenu dans ces pores ne pouvant pas s'écouler va être comprimé et sa pression va s'élever de dp .

A l'aide de la pompe, nous allons soutirer du liquide jusqu'à ce que le manomètre indique la pression p_0 , c'est-à-dire la pression initiale. Dans ces conditions, les circuits ainsi que l'eau salée n'ont pas subi de déformations par rapport à l'état initial " p_0 " et l'on peut dire que le volume indiqué par la pompe est égal à la diminution du volume de pores.

On peut procéder ainsi en augmentant graduellement la contrainte. L'opération inverse peut être réalisée en faisant décroître σ ;

dans ce cas il faudra injecter du liquide avec la pompe afin de remonter la pression à p_0 . On revient donc à l'état de contraintes initial, σ_0 et p_0 .

Ensuite il est possible de fixer une autre pression de pores p_1 et de recommencer la même expérience que précédemment.

On obtient ainsi une famille de courbes $\Delta V_p = f(\sigma)$ pour différentes pressions p_i .

Si l'on considère l'expression du coefficient de compressibilité :

$$C_p = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{dV_p}{d\sigma} \quad \text{à } p \text{ constant,}$$

on voit que celui-ci pourra facilement être calculé en mesurant les

pentés de la coube $\frac{dV_p}{V_p} = f(\sigma)$, et pourra être représenté en fonction de σ .

b) Essai de production

Nous partons dans cette expérience d'un état de contrainte σ_0 , p_0 , mais c'est le paramètre p qui va varier, σ_0 restant constante.

Si l'on augmente la pression p d'une valeur dp , le volume de pores va s'accroître, mais en même temps nous allons comprimer l'eau salée et dilater les circuits.

Donc le volume lu sur la pompe ΔV pour élever la pression de p à $p + dp$ résulte de trois effets :

- la variation ΔV_p de volume de pores qui nous intéresse.
- la dilatation ΔV_c des circuits métalliques (tubings, vannes) due à la déformation.

- la diminution ΔV_w du volume de l'eau salée due à l'augmentation de pression.

Il faut donc faire la correction :

$$\Delta V_p = \Delta V - (\Delta V_c + \Delta V_w)$$

Le terme ΔV_c ne peut être connu que par un étalonnage. Quant au terme ΔV_w , il peut être lu dans divers abaques de recueils techniques.

Nous reparlerons de ces corrections en fin de chapitre.

L'essai de production peut être continué en augmentant la pression p ou en la diminuant ; ce dernier cas correspond mieux à l'appellation que nous en avons donnée.

Ensuite une autre contrainte σ_1 est fixée et on peut recommencer les séries d'expériences.

Comme précédemment, une famille de courbes est obtenue :

$$\Delta V_p = g(p)$$

pour différentes contraintes σ_1 .

Si l'on exprime le coefficient de compressibilité par :

$$C'_p = \frac{1}{V_p} \cdot \frac{dV_p}{dp} \quad \text{à } \sigma \text{ constant,}$$

celui-ci pourra être tiré des pentes des courbes $\frac{dV_p}{V_p} = g(p)$ et sera représenté en fonction de p .

Remarques :

En ce qui concerne les essais de compression et de production, chaque série d'expériences n'est pas immédiate. Il faut noter que les déformations sont visco-élastiques et qu'un certain temps est nécessaire pour que la roche atteigne la déformation correspondant à l'état de contraintes. A chaque palier de contrainte σ ou de pression p , il faudra observer ce temps de stabilisation ; la limite sera atteinte lorsque le manomètre donnant la pression de pores n'indiquera plus de variations. Nous verrons que ces temps sont parfois relativement longs.

Bien qu'aucune fluctuation de température n'ait été observée, il faudra s'efforcer de faire les lectures au même moment du cycle de régulation de l'étuve.

4) Mesures du coefficient de compressibilité solide

La mesure de ce coefficient nécessite une installation autre que celle que nous avons décrite jusqu'à présent. Le principe de mesure est en effet différent.

Le montage réalisé est représenté fig. 2. L'échantillon de roche est simplement posé à l'intérieur d'une cellule. En série avec celle-ci se trouvent une déviation pour branchement d'une pompe à vide et une déviation pour le remplissage. Enfin le montage se termine par une petite pompe volumétrique dont chaque division indique le mm^3 . Un manomètre vient se brancher en parallèle sur ce montage.

La saturation est effectuée avec de l'eau salée à 50 g par litre de Na Cl. Avant cette opération, le vide a été réalisé.

Ainsi la roche se trouve entièrement au contact de l'eau salée, c'est-à-dire que celle-ci mouille toute la surface solide.

Donc si, à l'aide de la pompe, nous modifions la pression p , nous allons comprimer la matrice solide de la roche et nous pourrons en tirer la variation de volume dV_s qui permet de calculer le coefficient de compressibilité solide :

$$C_s = \frac{1}{V_s} \cdot \frac{dV_s}{dp}$$

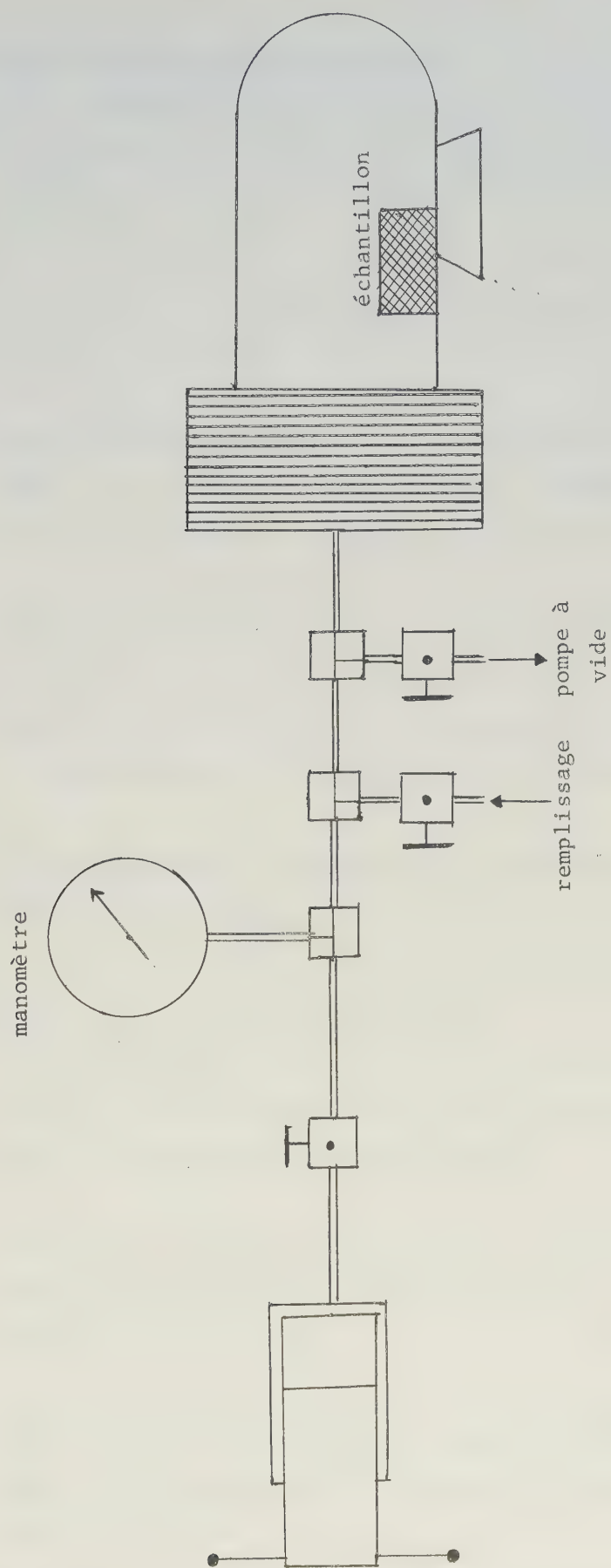
Il est bien entendu que le volume que nous lisons sur la pompe lors d'une compression est la somme de trois effets :

- la réduction du volume solide.
- la compression de l'eau.
- la dilatation des circuits.

Un étalonnage s'impose, nous le verrons en fin de ce chapitre.

fig. 2

MONTAGE DE MESURE DE
COMPRESSIBILITE SOLIDE



5) Mesures de conductivité électrique

Dans la description de la cellule porte-échantillon, on a pu remarquer que le tubing du diffuseur aval était enrobé d'une matière plastique isolante. Le but est de le rendre électriquement indépendant de l'ensemble de la cellule.

En série avec ce tubing, toute la raccorderie en aval de l'échantillon est également isolée.

Quant au diffuseur amont, il est en contact avec toute la raccorderie amont, la cellule et l'étuve. Tous ces organes sont donc au même potentiel que nous choisirons comme potentiel de référence.

Dans ces conditions les deux diffuseurs peuvent servir d'électrodes aux extrémités de l'échantillon. Celles-ci sont reliées à un impédancemètre. Cet appareil envoie une tension de 150 millivolts maximum aux bornes de l'échantillon et mesure son impédance ainsi que son angle de déphasage. La tension envoyée est sinusoïdale et de fréquence variable (5H_z à 250KH_z).

Ces mesures peuvent être faites en même temps que les essais de compression et de production.

6) Mesures de la déformation des roches

Dans la description de la cellule porte-échantillon, le fonctionnement des tiges de déplacement a été décrit. Le problème posé est celui de mesurer les translations de ces tiges.

D'emblée le problème principal était de trouver un capteur de déplacement capable de fonctionner aux températures de l'expérience, celles-ci étant comprises entre 80°C et 130°C .

Un certain nombre de capteurs électroniques ont été étudiés mais aucun fonctionnement n'était garanti au-delà de 80°C . De plus la mesure des déformations nécessitant six capteurs, l'achat de ceux-ci atteignait un coût prohibitif.

Le choix s'est alors porté sur un appareil d'utilisation très simple, de prix réduit, ne nécessitant aucun réglage de départ et ayant une très bonne tenue en température : le comparateur. Nous avons choisi des comparateurs au micron et ayant une course de 2 mm.

Des essais ont permis de constater qu'à 150°C, la fiabilité n'était pas affectée grâce à un système mécanique compensateur de la dilatation.

Quatre comparateurs sont donc appliqués aux extrémités des quatre tiges de déplacement et deux autres aux extrémités des tubings des diffuseurs. Ces derniers étant au contact de la roche, ils suivent les déformations axiales de celle-ci.

Un autre problème s'est présenté en ce qui concerne la fixation des supports magnétiques des comparateurs. La cellule n'étant pas solidaire de l'étuve et celle-ci étant montée sur roulettes, il était impossible de fixer les supports sur l'armature de l'étuve. Une simple vibration sur celle-ci entraînait des déplacements par rapport à la cellule de plus de 100 microns.

La fixation la meilleure s'est avérée être sur le corps de la cellule. Des essais de déformations de celle-ci en fonction de la pression intérieure ont permis de discerner le profil de déformation selon une génératrice (fig. 3).

C'est à l'endroit de moindre déformation (au niveau des bouchons) qu'ont été fixés les supports. A chaque lecture des comparateurs a été soustraite la valeur correspondante.

Ces mesures sont également effectuées en même temps que les essais de compression et de production.

7) Mesures de la vitesse d'ondes ultra-sonores

Les variations en fonction des contraintes de la vitesse des ondes ultra-sonores dans un milieu poreux, qu'elles soient à émission longitudinale ou à émission transversale, constituent le sujet qui a été le plus approfondi dans la littérature spécialisée.

La meilleure théorie qui en a été dégagée est incontestablement celle de BIOT dans son article : "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid - Saturated Porous Solid", paru dans "The Journal of the acoustical society of America" (volume 28, number 2, march 1956).

Les expériences qui ont été effectuées sont multiples. On trouve autant de rapports provenant des U.S.A., d'U.R.S.S. et d'Europe. Nous nous contenterons de représenter dans la fig. 4 des courbes obtenues sur des grés de porosités différentes ; ces essais ont été faits par WYLLIE, GREGORY et GARDNER à la "Gulf Research and Development Company" (Pittsburgh, Pennsylvania).

Le but proposé dans le présent travail est de mettre en place un dispositif capable de mesurer ces vitesses sur des roches placées dans la cellule.

Les organes d'émission et de réception sont constitués par des petits cylindres de zirconate de plomb polarisés. Selon la polarisation, nous distinguerons les vibrations longitudinales des vibrations transversales.

Pour mettre ces céramiques piezo-électriques au contact de la roche, il a fallu modifier les diffuseurs et leur tubing comme l'indique le plan de la fig. 5. Deux alésages sont prévus pour loger deux céramiques, l'une à vibration longitudinale, l'autre à vibration transversale. Les gaines des fils de liaison sont emprisonnées dans un revêtement de plastique, ce qui évite ainsi tout arrachement lors des montages ou démontages.

On peut relier les fils à l'extérieur de la cellule et de l'étuve, à un générateur d'impulsions en ce qui concerne les céramiques émettrices, à un oscilloscope pour les céramiques réceptrices. Un simple interrupteur

fig. 4

VITESSE DU SON DANS LES ROCHES
SATUREES, EN FONCTION DE LA CONTRAINTE
APPLIQUEE

Vitesse
en m./s

ϕ = Porosité

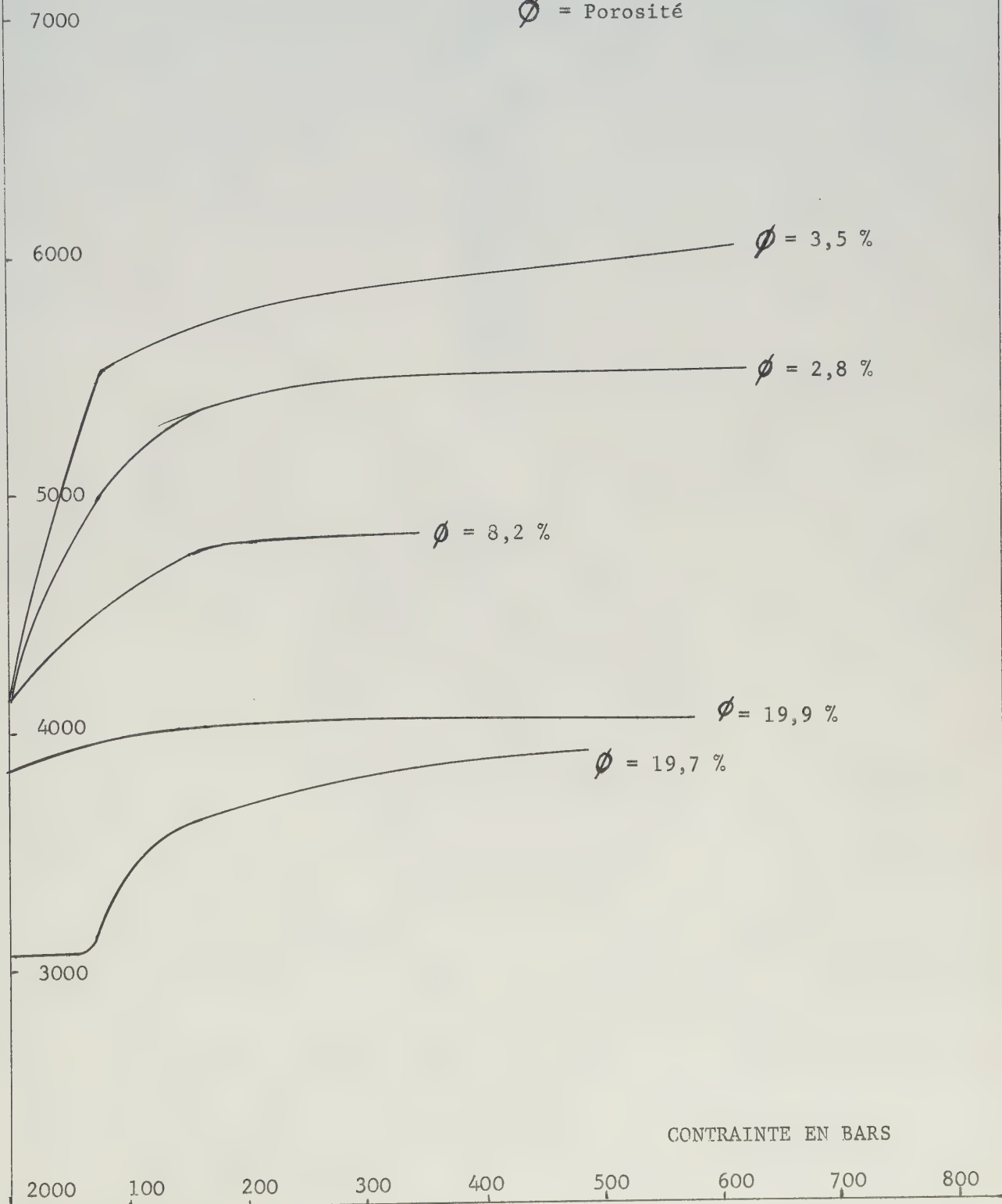
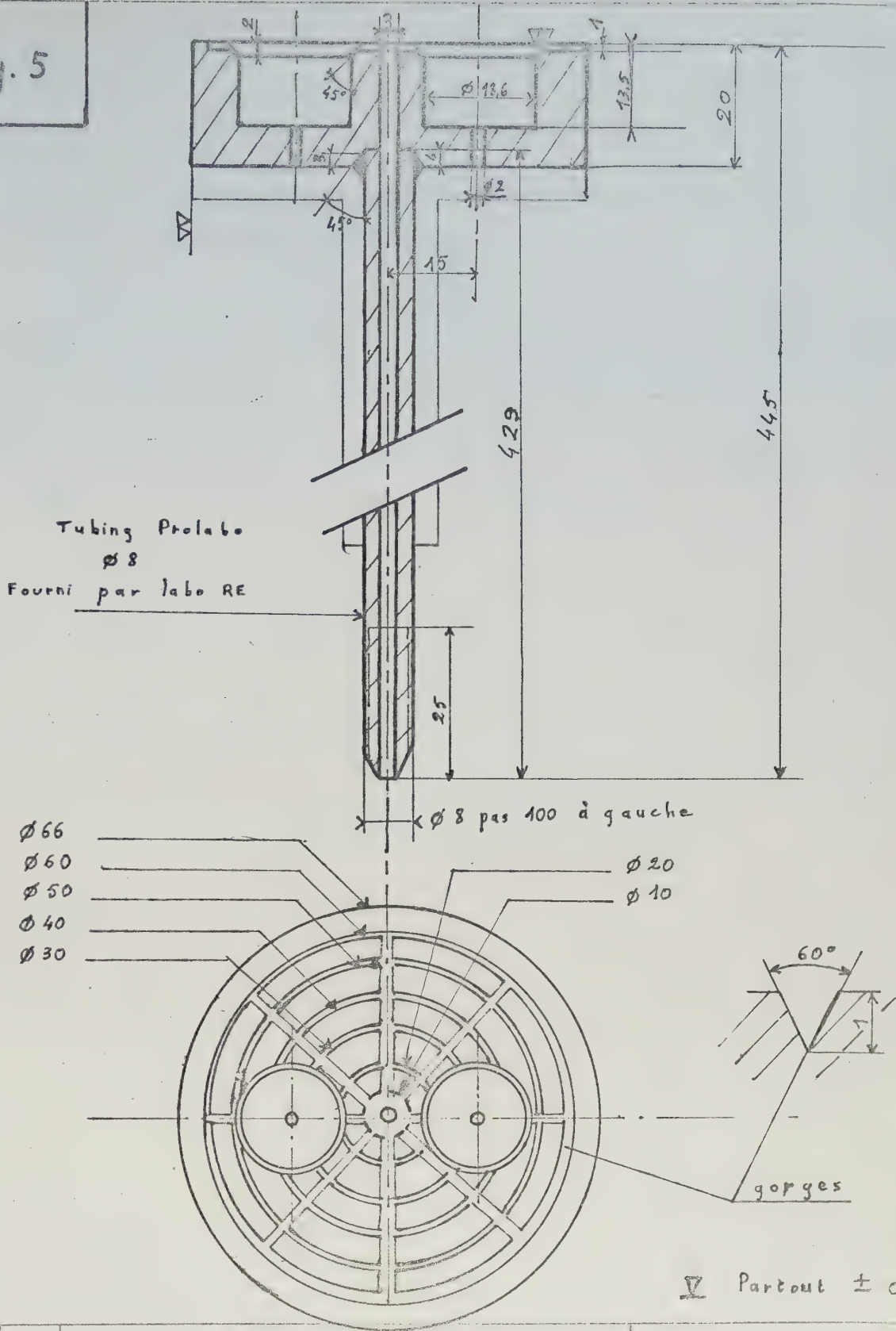


fig. 5

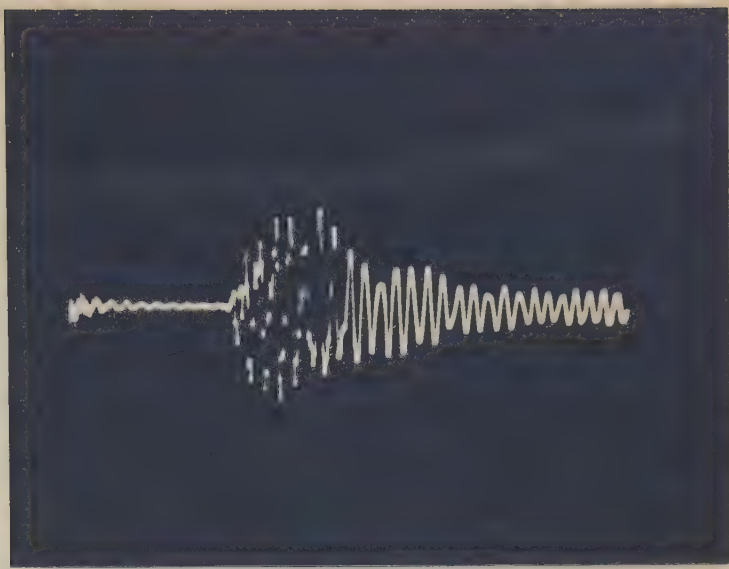
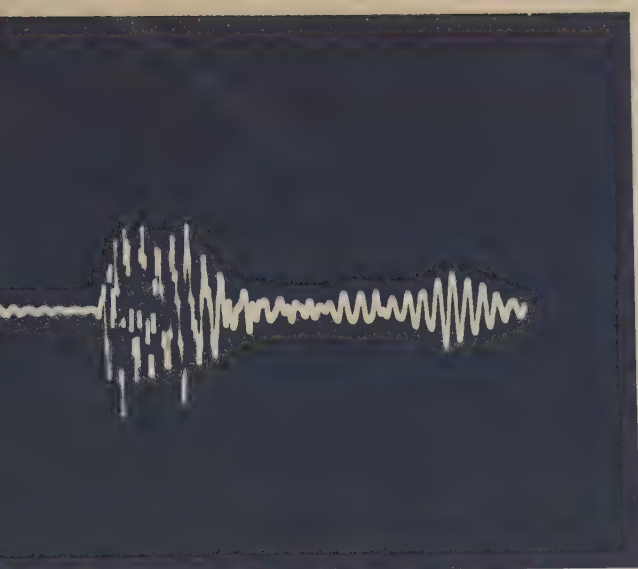


2	Diffuseur.		acier inox 18-10 R=60M	
REP.	NBRE	DESIGNATION	MATIERE OU OBS	NS
CELLULE POUR MESURES DE COMPRESSIBILITE EN CONDITIONS DE GISEMENT.			Dessiné par DELOS	25/5
			Vérifié par	
			Approuvé par	
			S.N.P.A.	
			FCH. 1	

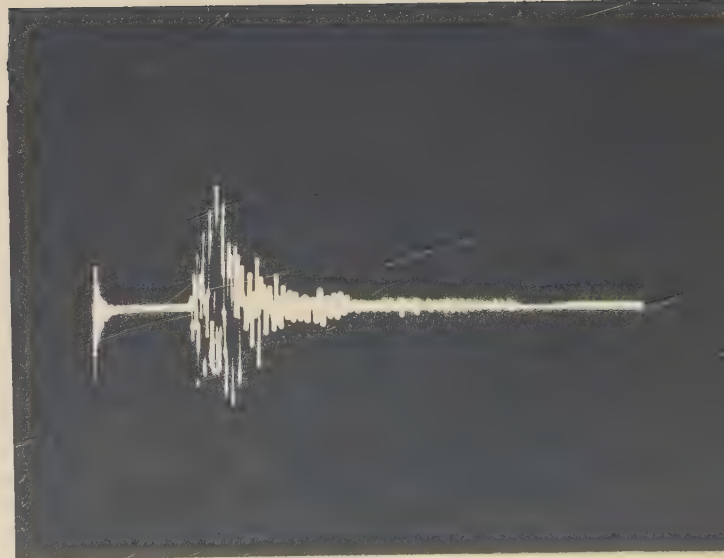
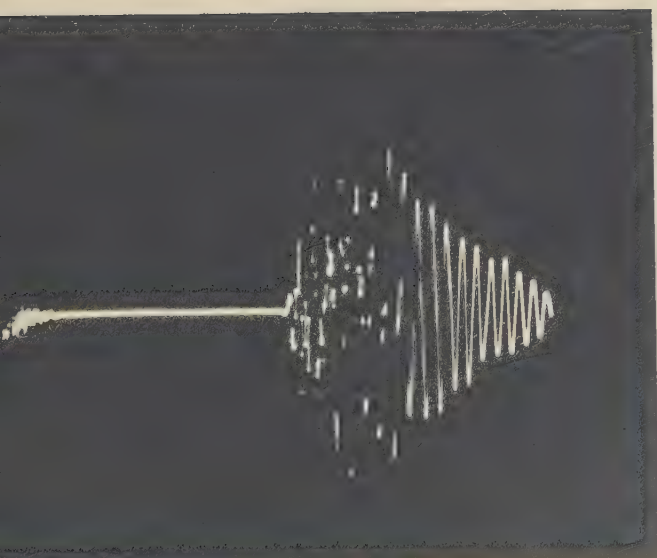
permet de faire fonctionner soit la céramique à émission longitudinale, soit celle à émission transversale.

On trouvera page suivante une photo des oscillogrammes obtenus pour différentes roches. Ce qui importait était de réaliser une expérimentation capable de mesurer les vitesses ultrasoniques dans les roches.

Quant aux variations de ces vitesses en fonction de la contrainte, les courbes de la fig. 4 en reflètent la loi générale.



OSCILLOGRAMMES ULTRASONIQUES



8) Corrections de compressibilité de l'eau, étalonnages

Nous avons vu dans ce qui précède que les mesures en essai de production et les mesures de compressibilité solide nécessitent une correction. En effet la variation de volume qui est lue sur la petite pompe volumétrique comprend la compression (ou la décompression) de l'eau et des circuits.

Si la compressibilité de l'eau distillée est bien connue grâce à des abaques, la question se pose de savoir quelle est celle de l'eau salée à 50 g par litre de Na Cl.

Des expériences ont été faites dans une cellule à différentes températures et pressions. Les résultats ont permis de conclure que l'eau salée avait la même compressibilité que l'eau distillée, en accord bien entendu avec la précision désirée.

Le tableau suivant donne les variations du volume spécifique en fonction de la température et de la pression. Il est tiré de la deuxième édition du Handbook de l' "American Institute of Physics", par DWIGHT et GRAY. On peut obtenir facilement les coefficients de compressibilité en calculant les tangentes à ces courbes.

La figure 6 retrace certaines des courbes du tableau de DWIGHT et GRAY. La figure 7 donne un exemple de compressibilité de l'eau distillée à 90°C.

Corrections de compressibilité de l'eau

Pression en bars	1	100	200	300	500	800	1000
Température °C	Volume Spécifique						
0	1,0001	0,9950	0,9902	0,9855	0,9765	0,9640	0,9563
20	1,0018	0,9972	0,9928	0,9885	0,9802	0,9686	0,9614
40	1,0078	1,0034	0,9990	0,9948	0,9869	0,9735	0,9686
60	1,0171	1,0127	1,0083	1,0041	0,9960	0,9846	0,9775
80	1,0290	1,0244	1,0199	1,0155	1,0071	0,9953	0,9879
100	1,0434	1,0384	1,0336	1,0290	1,0201	1,0076	0,9999
140	1,890	1,0741	1,0682	1,0626	1,0518	1,0370	1,0280
160	1,984	1,0960	1,0892	1,0828	1,0707	1,0542	1,0443
200	2,171	1,1490	1,1396	1,1310	1,1150	1,0941	1,0816
240	2,758	1,2196	1,2054	1,1927	1,1704	1,1426	1,1266
260	2,452	1,2655	1,2471	1,2310	1,2037	1,1708	1,1525
300	2,638	1,3978	1,3602	1,3313	1,2867	1,2380	1,2129
340	2,824	21,49	1,5689	1,4928	1,4036	1,3250	1,2881
360	2,922	23,32	1,825	1,6273	1,4852	1,3790	1,3331
400	3,102	26,41	9,969	2,814	1,735	1,516	1,444
440	3,288	29,11	12,232	6,221	2,271	1,716	1,589
460	3,380	30,38	13,161	7,178	2,750	1,850	1,677
500	3,565	32,79	14,783	8,703	3,906	2,195	1,895
550	3,797	35,58	16,54	10,168	5,111	2,758	2,248
600	4,028	38,31	18,16	11,435	6,102	3,375	2,669
650	4,261	40,96	19,68	12,587	6,954	3,971	3,114
700	4,491	43,55	21,12	13,653	7,726	4,518	3,541
750	4,721	46,06	22,40	14,640	8,419	5,016	3,949
800	4,951	48,55	23,81	15,59	9,061	5,476	4,334
850	5,183	51,01	25,11	16,51	9,673	5,911	4,701
900	5,413	53,47	26,40	17,41	10,266	6,328	5,053
950	5,644	55,91	27,67	18,30	10,844	6,730	5,391
1000	5,875	58,38	28,96	19,19	11,421	7,120	5,717

Fig. 6

$V_s \text{ cm}^3/\text{g}$

COMPRESSIBILITE DE L'EAU DISTILLEE

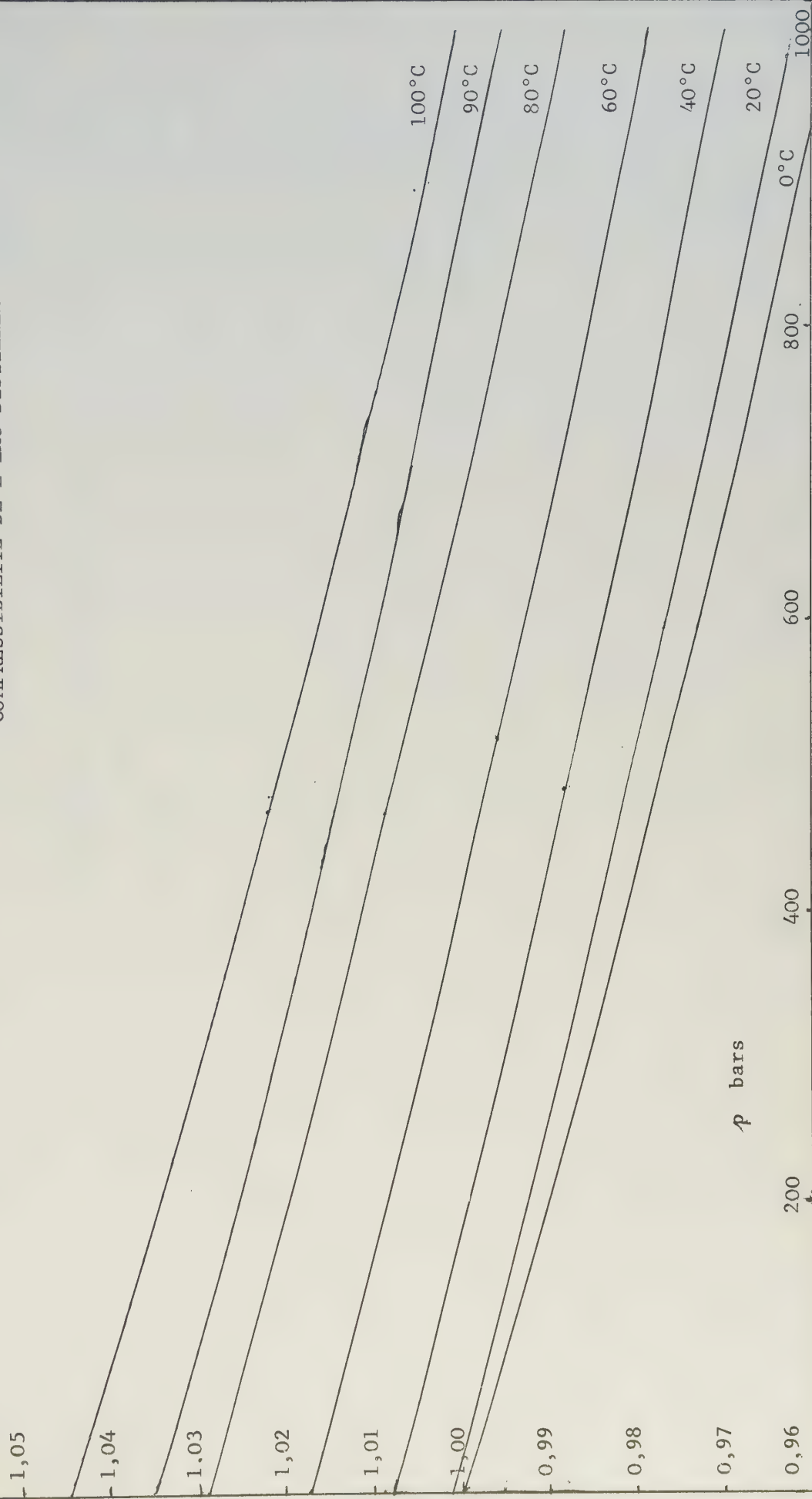


fig. 7

$-0,8 \cdot 10^{-4}$

C_w en (bar)⁻¹

$-0,6 \cdot 10^{-4}$

$-0,4 \cdot 10^{-4}$

$-0,2 \cdot 10^{-4}$

COMPRESSIBILITE DE L'EAU DISTILLEE

A 90°C

p bars	C_w (bar) ⁻¹
80	$0,6 \times 10^{-4}$
160	0,52 —
240	0,46 —
320	0,46 —
400	0,52 —
480	0,4 —
560	0,37 —
640	0,345 —
720	0,32 —
800	0,3 —
880	0,29 —
960	0,275 —

p bars

200

400

600

800

1000

Quant au terme correctif de compression ou de décompression des circuits, il n'est accessible que par l'étalonnage expérimental. Celui-ci a été réalisé en remplaçant l'échantillon de roche par un cylindre d'acier percé axialement pour permettre la communication entre circuit aval et circuit amont.

En augmentant la pression de l'eau salée saturant les tubings, la déformation de l'alésage du cylindre d'acier est absolument négligeable devant la déformation des autres circuits.

En mesurant les variations de volume à l'aide de la petite pompe volumétrique, on en déduit le terme correctif de déformation volumique des circuits saturés.

La répétition de ces essais a montré une fidélité satisfaisante comme l'indiquent le tableau ci-après et la figure 8.

Il est à noter l'importance de la température qui rend plus déformables les tubings et autres éléments de raccorderie.

Correction de compressibilité des circuits

$\theta = 70^{\circ}\text{C}$

P bars	1er essai	2e essai	3e essai
50	0	0	0
100	200	175	172
150	357	335	339
200	519	503	505
250	680	665	675
300	838	823	834
350	988	981	993
400	1138	1131	1148
450	1295	1299	1311
500	1440	1440	1460
550	1598	1603	1619
600	1761	1765	1776
650	1953	1953	1961

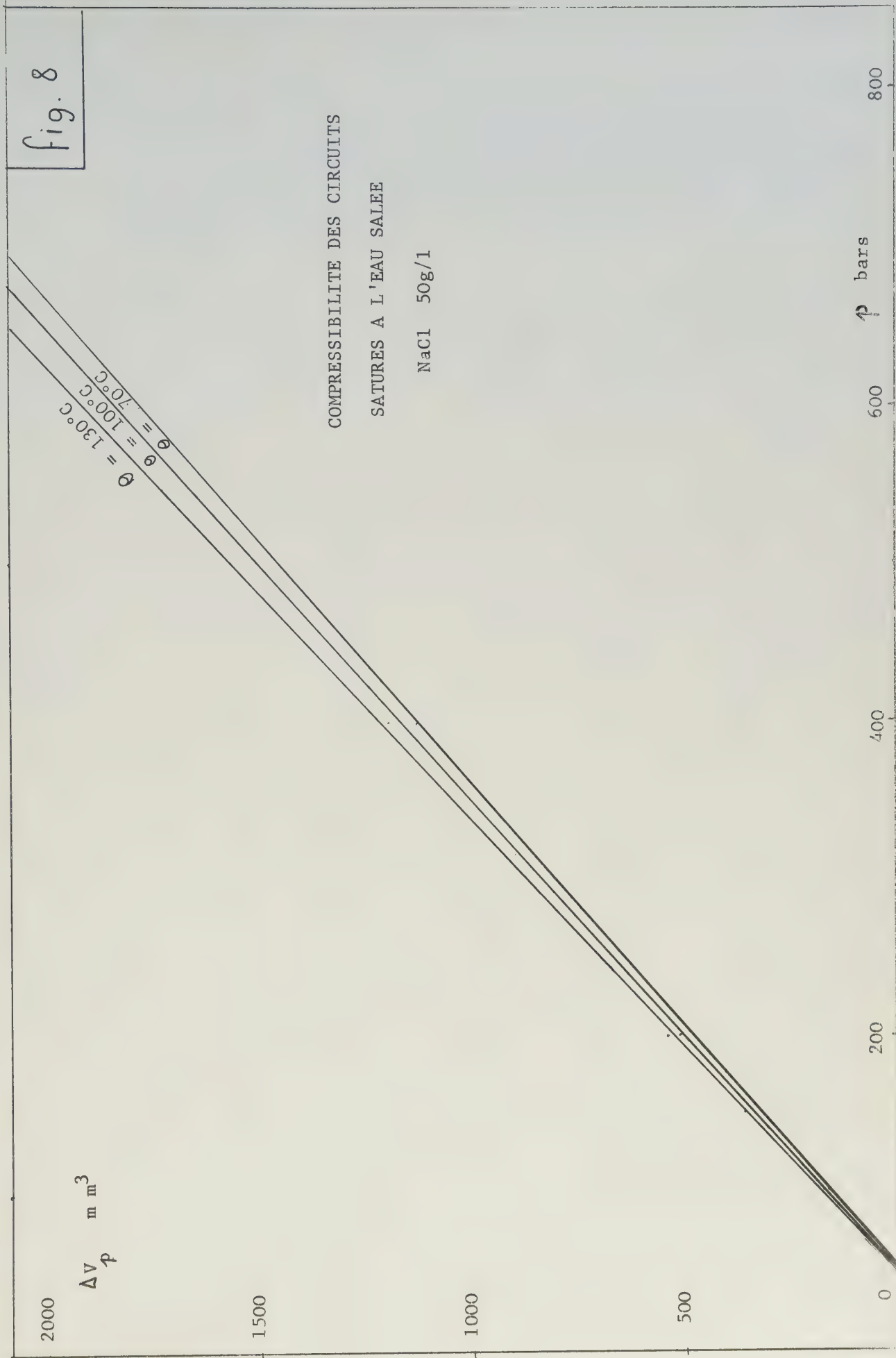
$\theta = 100^{\circ}\text{C}$

P bars	1er essai	2e essai	3e essai
50	0	0	0
100	175	182	176
150	347	353	349
200	515	524	519
250	683	692	688
300	844	856	852
350	1008	1019	1015
400	1261	1170	1173
450	1322	1341	1337
500	1475	1495	1490
550	1637	1662	1646
600	1812	1825	1805
650	2019	2019	2001

$\theta = 130^{\circ}\text{C}$

P bars	1er essai	2e essai
50	0	0
100	185	165
150	370	355
200	537	538
250	716	698
300	880	862
350	1043	998
400	1208	1166
450	1373	1341
500	1528	1515
550	1694	1678
600	1858	1855
650	2057	2060

Fig. 8



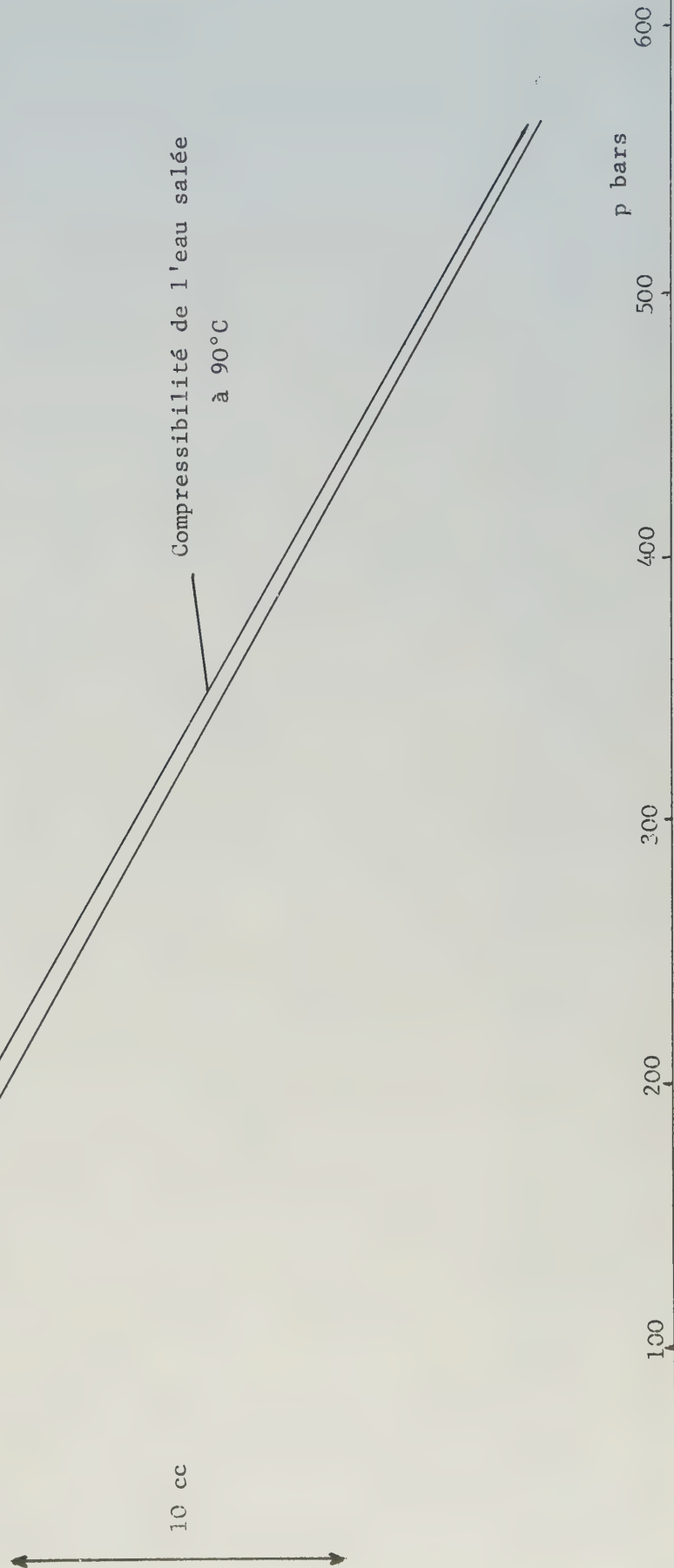
Pour l'étalonnage concernant les mesures de compressibilité solide, on sature d'eau salée les circuits et la cellule ; grâce à la petite pompe volumétrique on augmente la pression interne et on mesure les variations de volume.

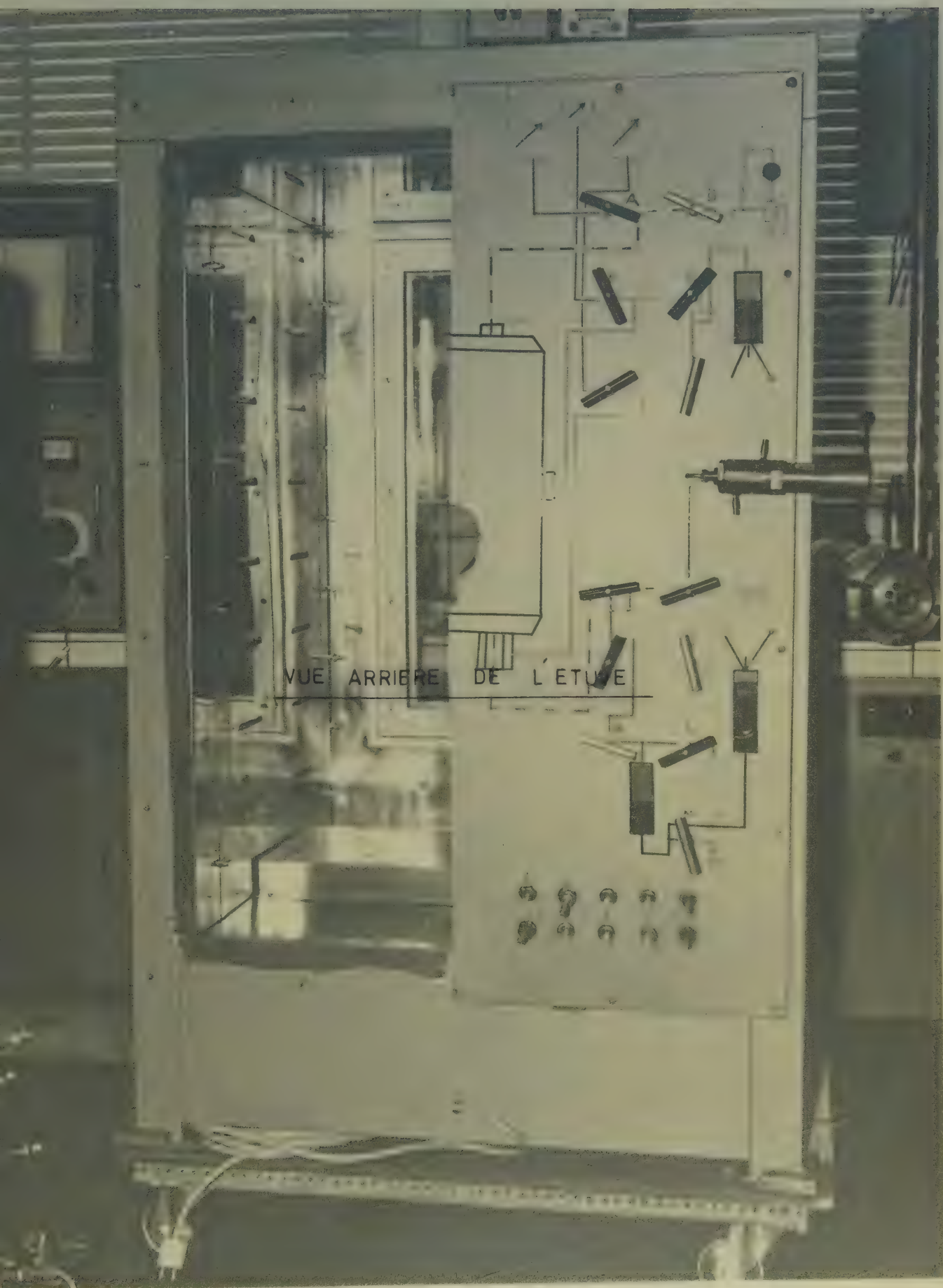
Le tableau suivant indique ces variations de volume en fonction de la pression. La figure 8 montre la compressibilité de l'ensemble cellule + eau salée, d'où l'on en déduit la compressibilité de la cellule seule.

P_{bars}	dV_{tcc}
10	1,08
30	2,09
50	3,1
88	5
100	5,57
150	8
190	9,88
250	12,085
300	14,25
313	14,86
350	16,47
400	18,62
423	19,62
450	20,745
500	22,82
536	24,34

Fig. 9

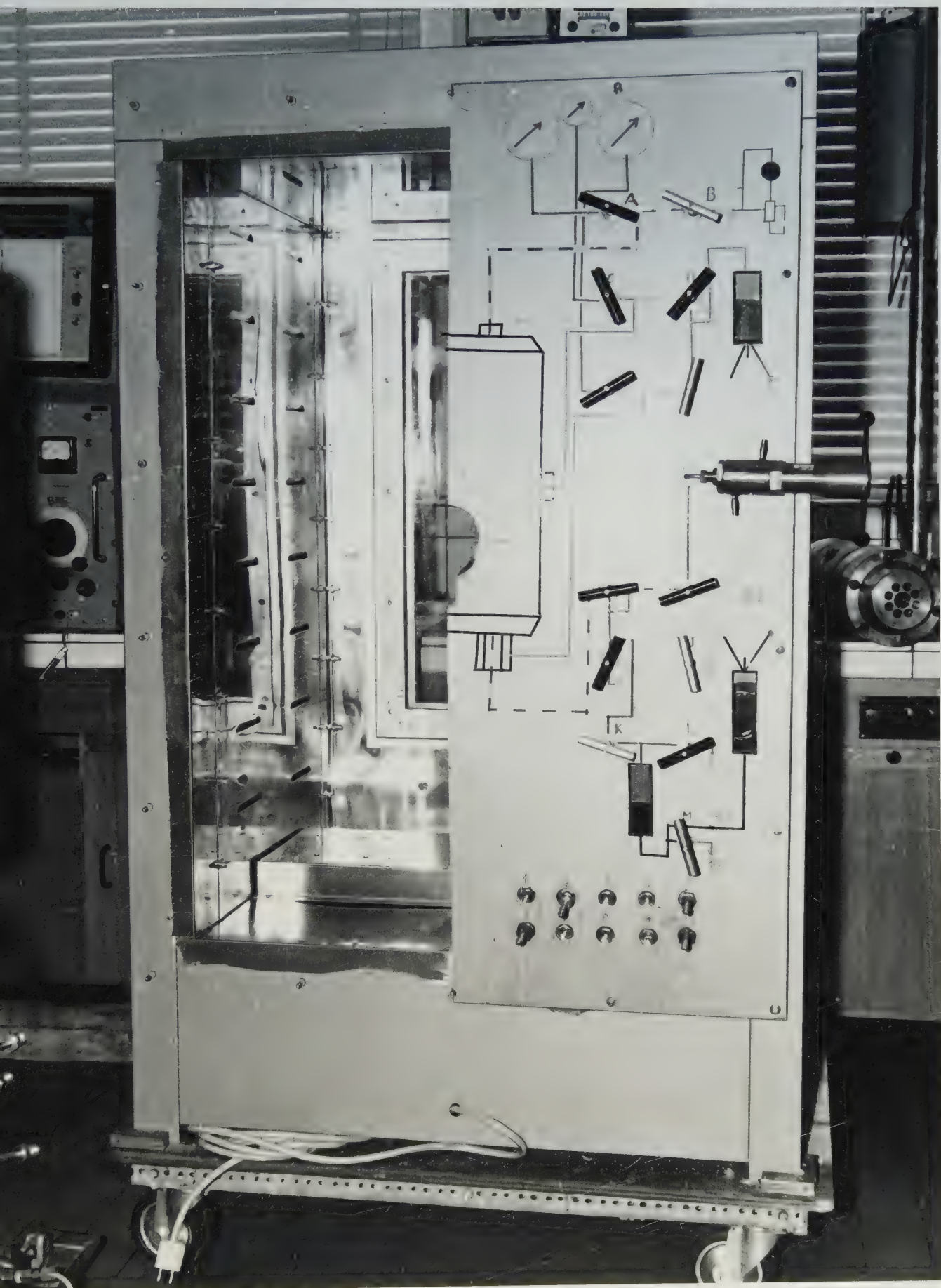
ETALONNAGE - DEFORMATION DE LA CELLULE
DE MESURES DE COMPRESSIBILITE SOLIDE A 90°C

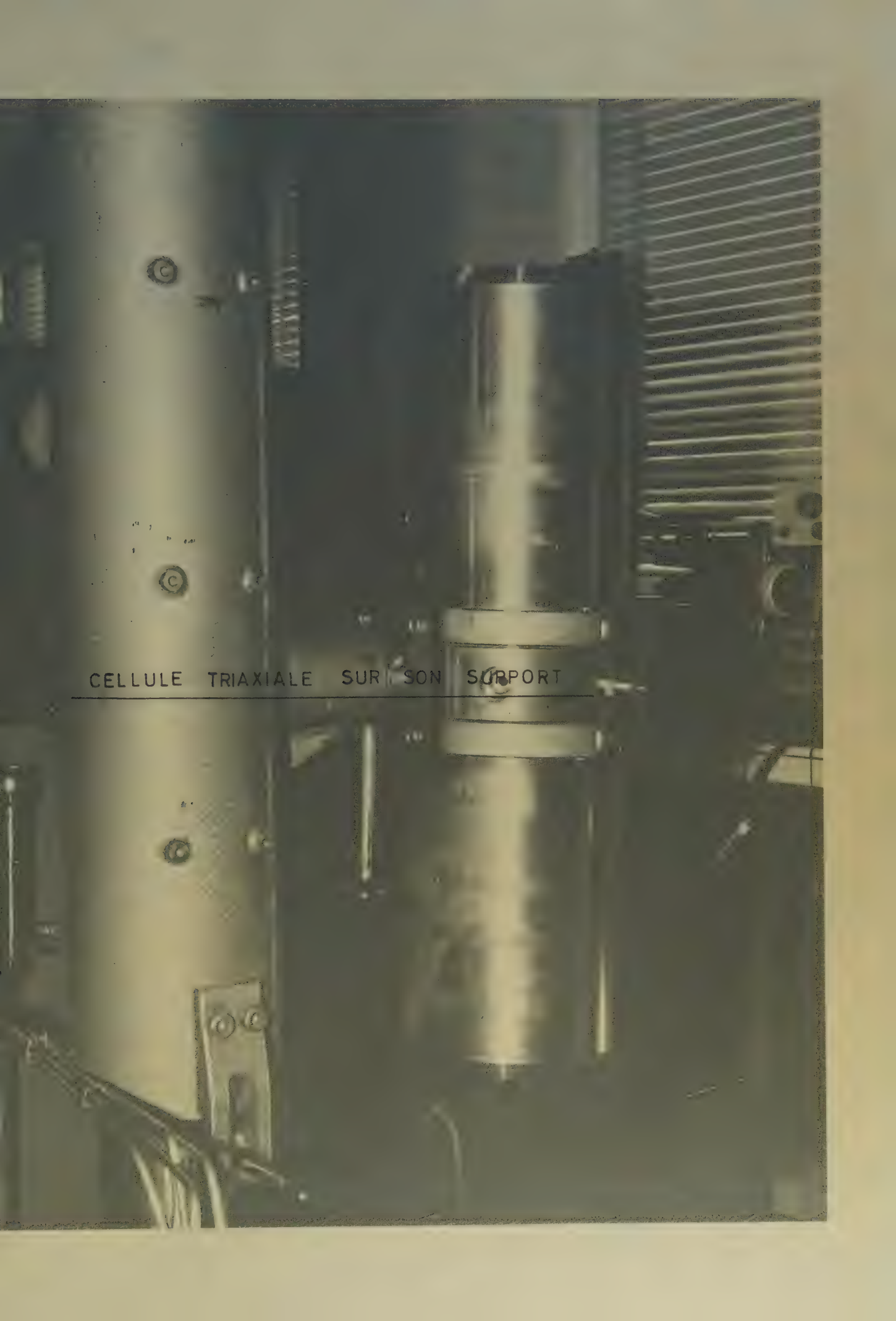




VUE ARRIERE DE L'ETUDE

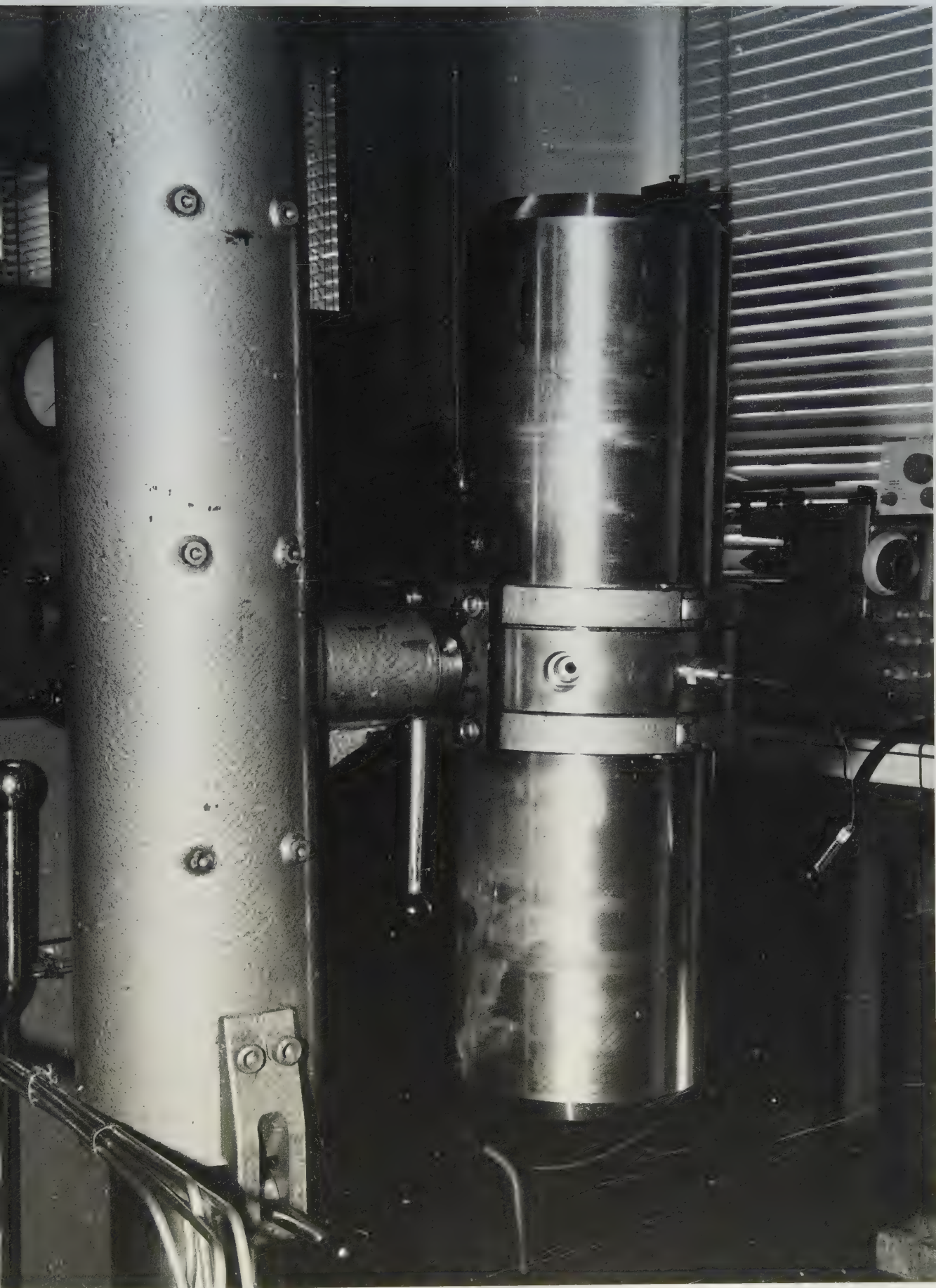
VUE ARRIERE DE L'ETUVE





CELLULE TRIAXIALE SUR SON SUPPORT

CELLULE TRIAXIALE SUR SON SUPPORT

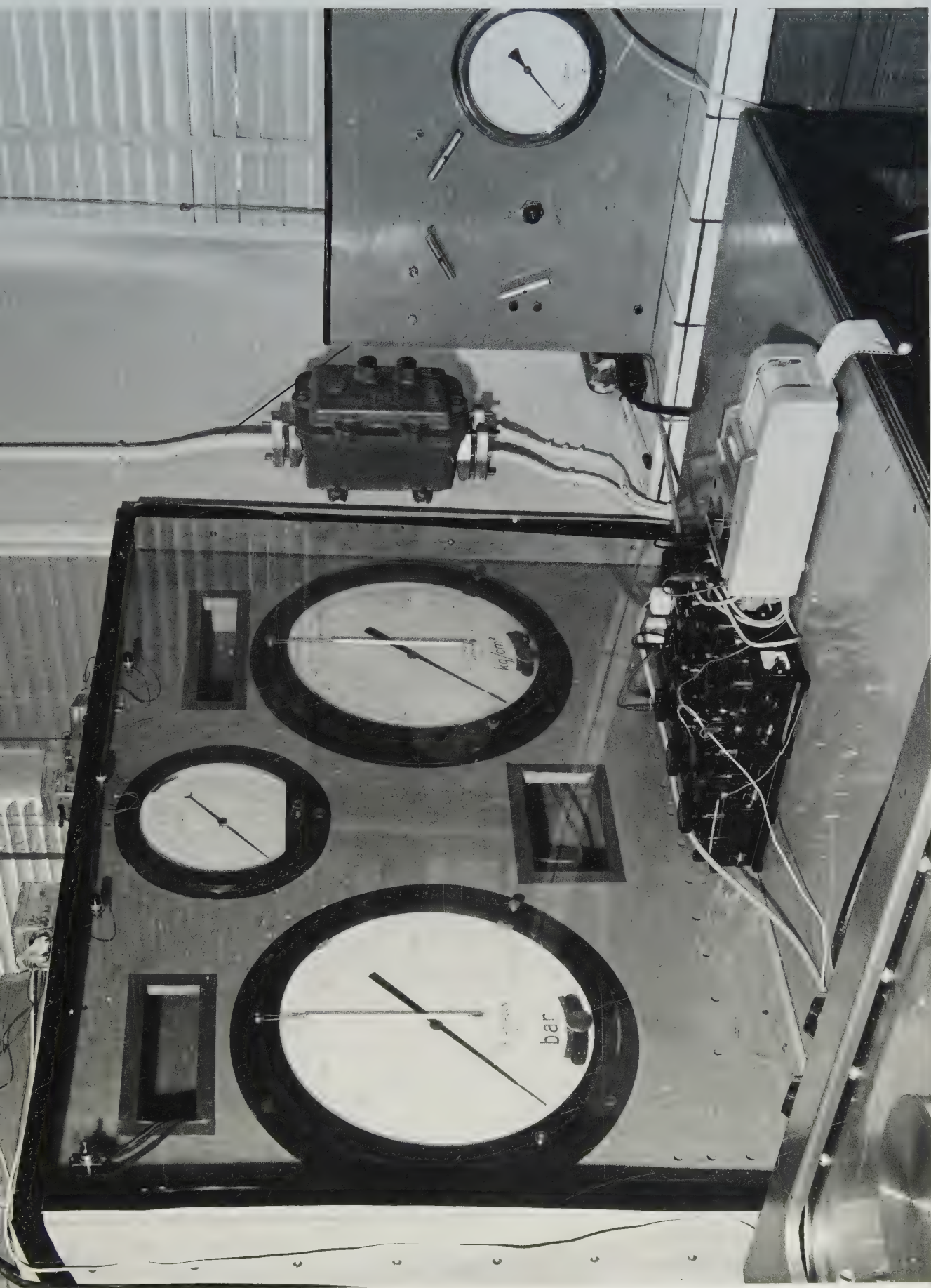


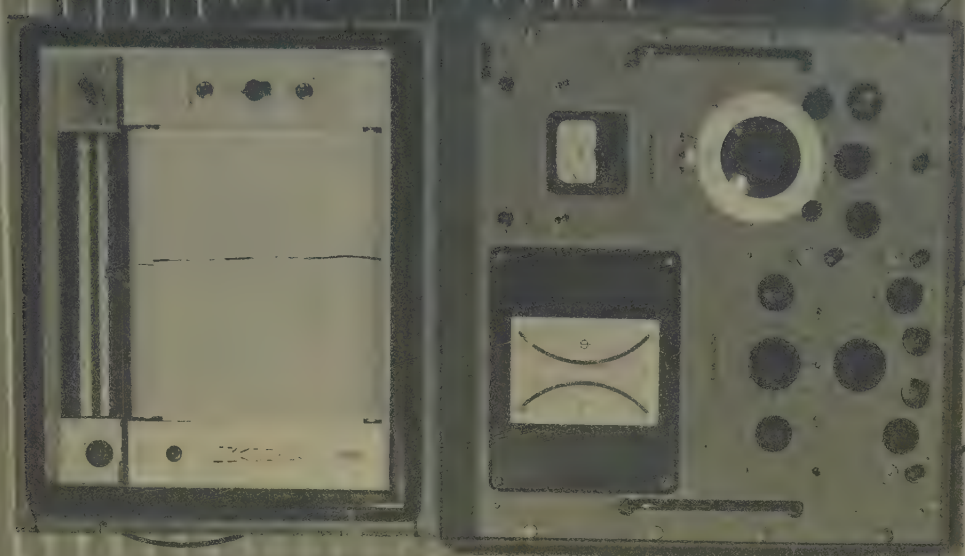


CONTROLE DES PRESSIONS

bar

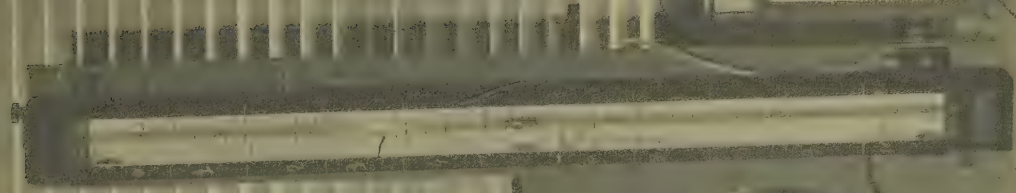
CONTROLE DES PRESSIONS





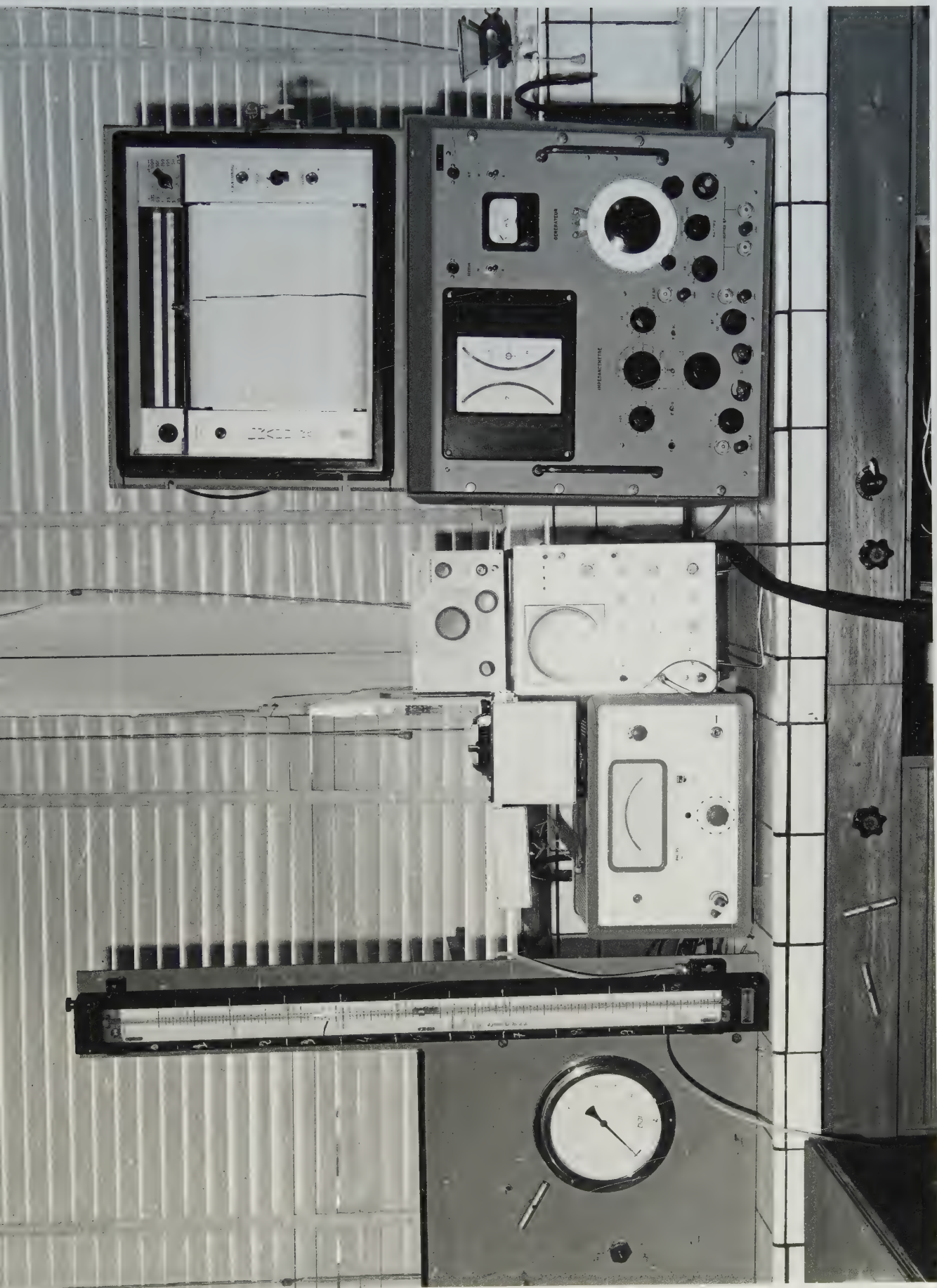
APPAREILS DE MESURES

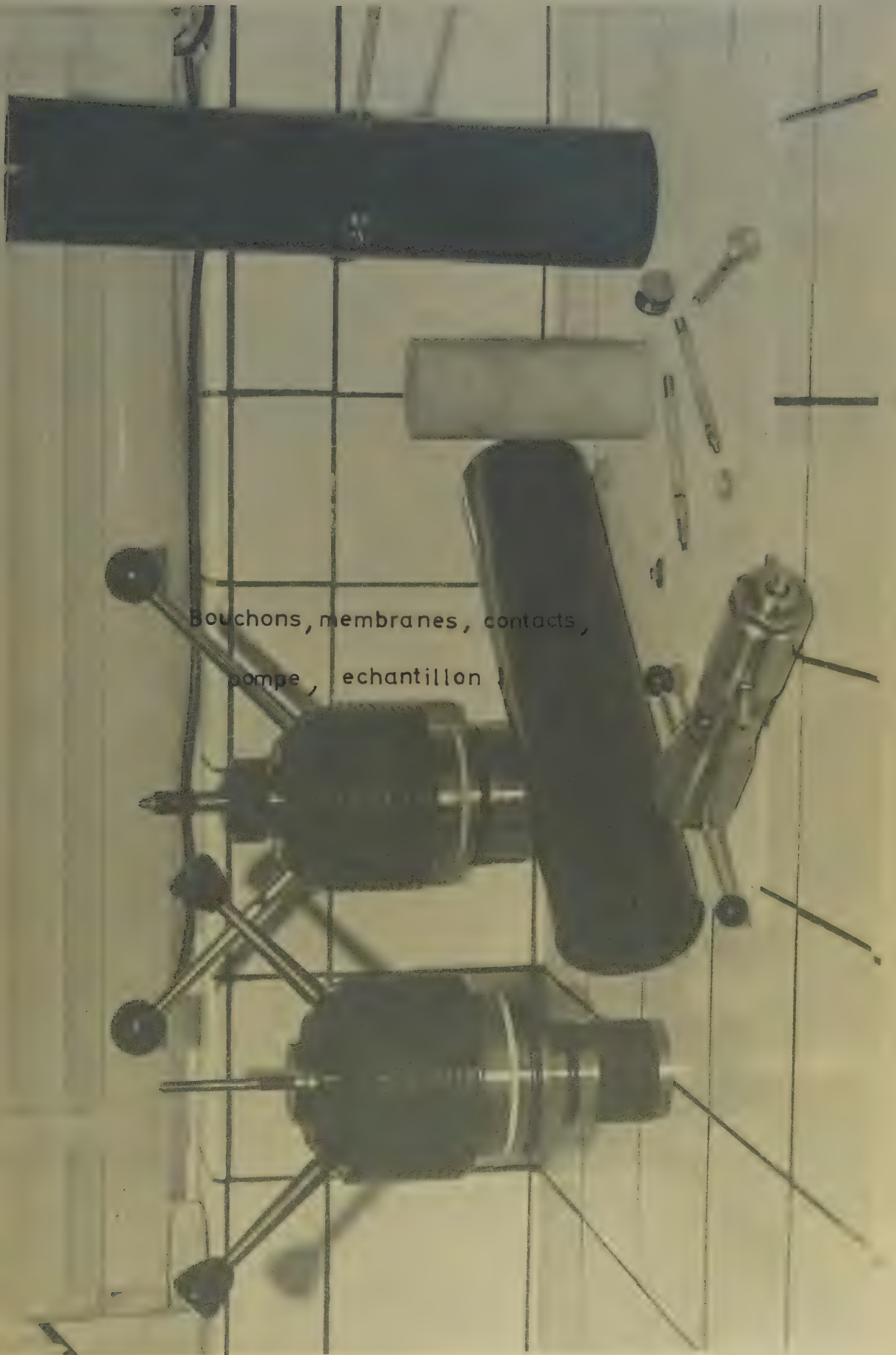
- Impédancemètre
- Générateur d'impulsion
- Enregistreur de températures



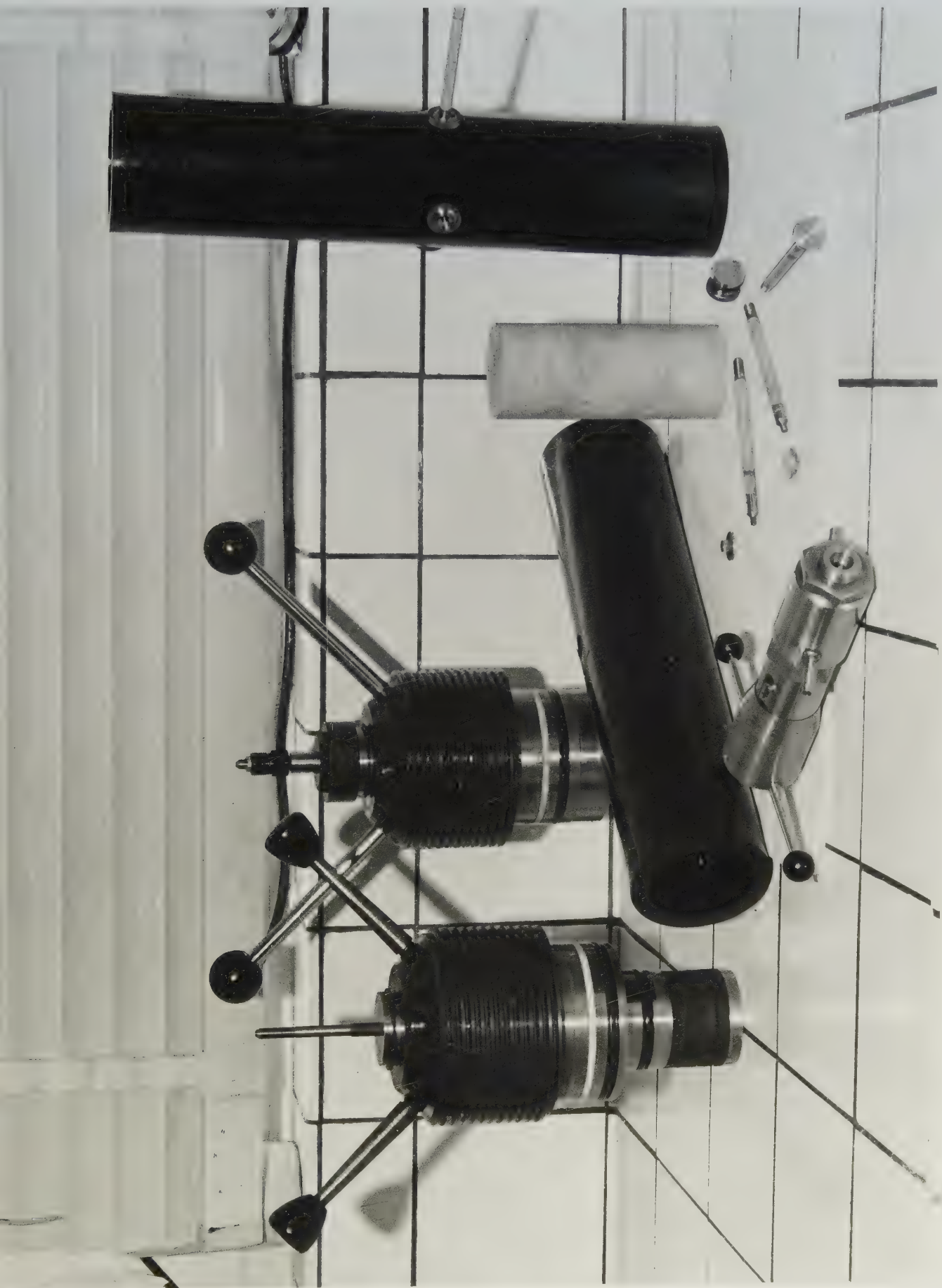
APPAREILS DE MESURES -

- Impédancemètre
- Générateur d'impulsions
- Enregistreur de températures





Bouchons, membranes, contacts,
pompe, échantillon.



CHAPITRE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - CONDITIONNEMENT GENERAL DES ESSAIS

Le fluide saturant utilisé pour tous les échantillons est de l'eau salée à 50g/litre de NaCl. Nous avons donné précédemment les raisons du choix de cette concentration.

La gamme de pression et de contraintes appliquées ne dépassera pas 700 bars. Pour chaque échantillon, les contraintes géostatique et de confinement ne seront pas supérieures à celles régnant effectivement dans le gisement.

Il sera impératif de conserver la contrainte de confinement supérieure d'au moins 20 bars à la pression de pores, ceci dans un souci d'étanchéité.

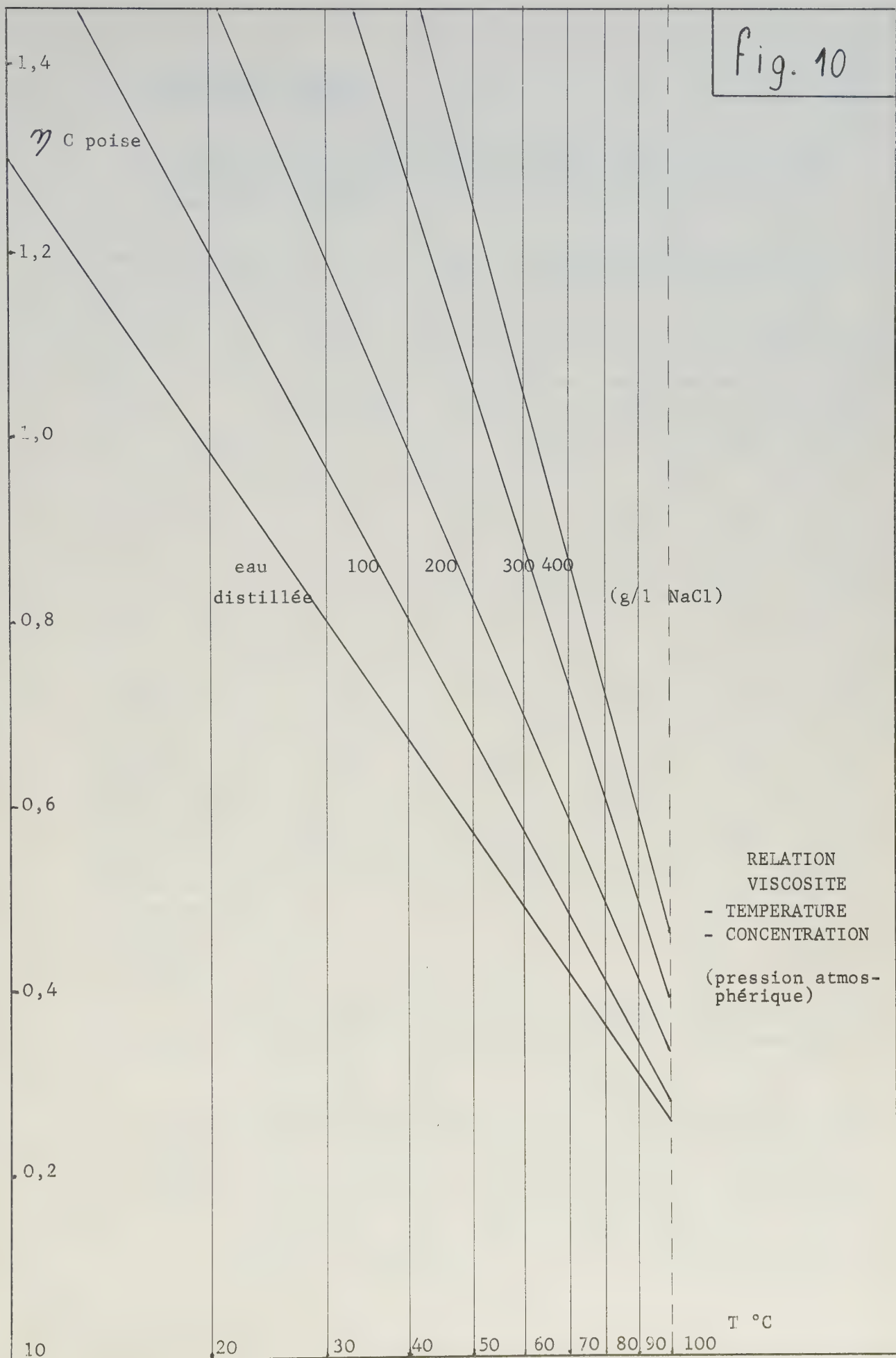
En ce qui concerne les débits utilisés pour mesurer les perméabilités, nous avons vu précédemment que nous fixions une condition limite :

$$\frac{u \cdot Q_m}{\mu \cdot S} < 0,01$$

et que nous adoptions pour u la valeur $2 \cdot 10^{-3}$ cm.

La section des échantillons étant égale à 34 cm^2 et la viscosité de l'eau salée étant d'environ 0,3 centipoises aux températures étudiées (fig. 10), nous en déduisons que Q_m devra être inférieur à environ 1800 cc/heure. C'est en fait un débit nettement inférieur que nous avons utilisé à chaque essai, ce qui permettait d'affirmer que les conditions de la loi de Darcy étaient respectées.

fig. 10



B - ECHANTILLONS ETUDIES

Le tableau ci-après donne les principales caractéristiques des échantillons étudiés :

Echantillons	KF 2/4 4AX	LS81	AR16 F45b	RO ₁ A	RO ₂ F
Nature	Calcaire	Calcaire	grès	Calcaires dolomitiques	
Cote	10281 pieds	618,8 m	3130 pieds	6121,5 pieds	6194 pieds
Poids sec en g	144,705	1142,6	2331,2	1406,9	2067,10
V _T en cc	81,131	529,926	984,318	544,793	816,458
V _p en cc	27,461	107,190	100,765	50,647	91,089
Ø %	33,9	20,2	10,2	9,3	11,2
Densité solide	2,696	2,703	2,638	2,847	2,850
Densité apparente	1,784	2,156	2,368	2,582	2,532
K mdarcy	4,28	8,35	26,4	9,26	25,47
Diamètre en mm	66	66	66	66	66
Longueur en mm	24	154,80	282	160	240
Structure	homogène, très fin, peu conso- lidé	homogène, microfis- sures	très ho- mogène grain moyen.	très vacuolaires fissures apparentes	
Conditions de gisement	$\sigma = 450$ bars $p = 400$ bars $\theta = 130^{\circ}\text{C}$	$\sigma = 100$ bars $p = 60$ bars $\theta = 70^{\circ}\text{C}$	$\sigma = 650$ bars $p = 320$ bars $\theta = 100^{\circ}\text{C}$	$\sigma = 400$ bars $p = 180$ bars $\theta = 90^{\circ}\text{C}$	

C - MESURES DES PERMEABILITES1) Variations de la perméabilité en fonction de la contrainte σ .a) Echantillon KF 2/4 4AX

L'aval de l'échantillon débouchant à la pression atmosphérique, il est impossible de réaliser cette expérience à la température de 130°C du gisement, l'eau devenant vapeur. Nous avons adopté $\theta = 90^\circ\text{C}$ et cette température reste constante pendant tous les essais de perméabilité.

Le débit choisi est de 191,433 cc/heure. Si l'on regarde le graphe de la perméabilité en fonction de la contrainte (fig. 11), on voit que le début de la courbe a été extrapolé. Cette partie de la courbe n'est certainement pas linéaire, mais les premiers points ont été obtenus avec une très mauvaise précision. Nous pensons que cette imprécision vient du fait que le temps de stabilisation n'a pas été suffisamment respecté.

Néanmoins, la conclusion de cette première expérience n'est pas négative ; elle permet d'entrevoir une diminution de perméabilité de l'ordre de 40 % et plus pour une compression de 500 bars.

b) Echantillon LS81 - Influence de la température

- Perméabilité à l'air.

Ces essais sont effectués pour des températures de 70°C puis 90°C ; on remesure ensuite la perméabilité à 70°C.

De plus pour chaque température, la perméabilité est mesurée en faisant varier la pression extérieure de 50 à 700 bars puis de 700 à 50 bars.

Dans le graphe de la figure 12, nous n'avons pas mentionné les valeurs obtenues en faisant décroître σ et la température, celles-ci étant pratiquement confondues avec les précédentes.

Les débits sont mesurés à l'aide du débitmètre à lame de savon et la perméabilité est déduite de la loi de DARCY adaptée aux gaz :

$$K = \mu \cdot \frac{L}{S} \cdot \frac{V}{t \cdot \Delta P} \cdot \frac{P_A}{P_m}$$

t est le temps d'ascension d'une bulle de savon dans un tube de volume V.

Le régime d'écoulement laminaire est plus délicat à déterminer. Nous avons fait des essais en appliquant une différence de pression ΔP de 8 bars et nous avons constaté que pour $\Delta P = 2$ bars les résultats obtenus étaient les mêmes, donc que nous étions en écoulement laminaire.

Les courbes obtenues observent une décroissance uniforme.

Pour une compression de 0 à 700 bars, nous notons une réduction de 25 % de la perméabilité, réduction qui semble indépendante de la température.

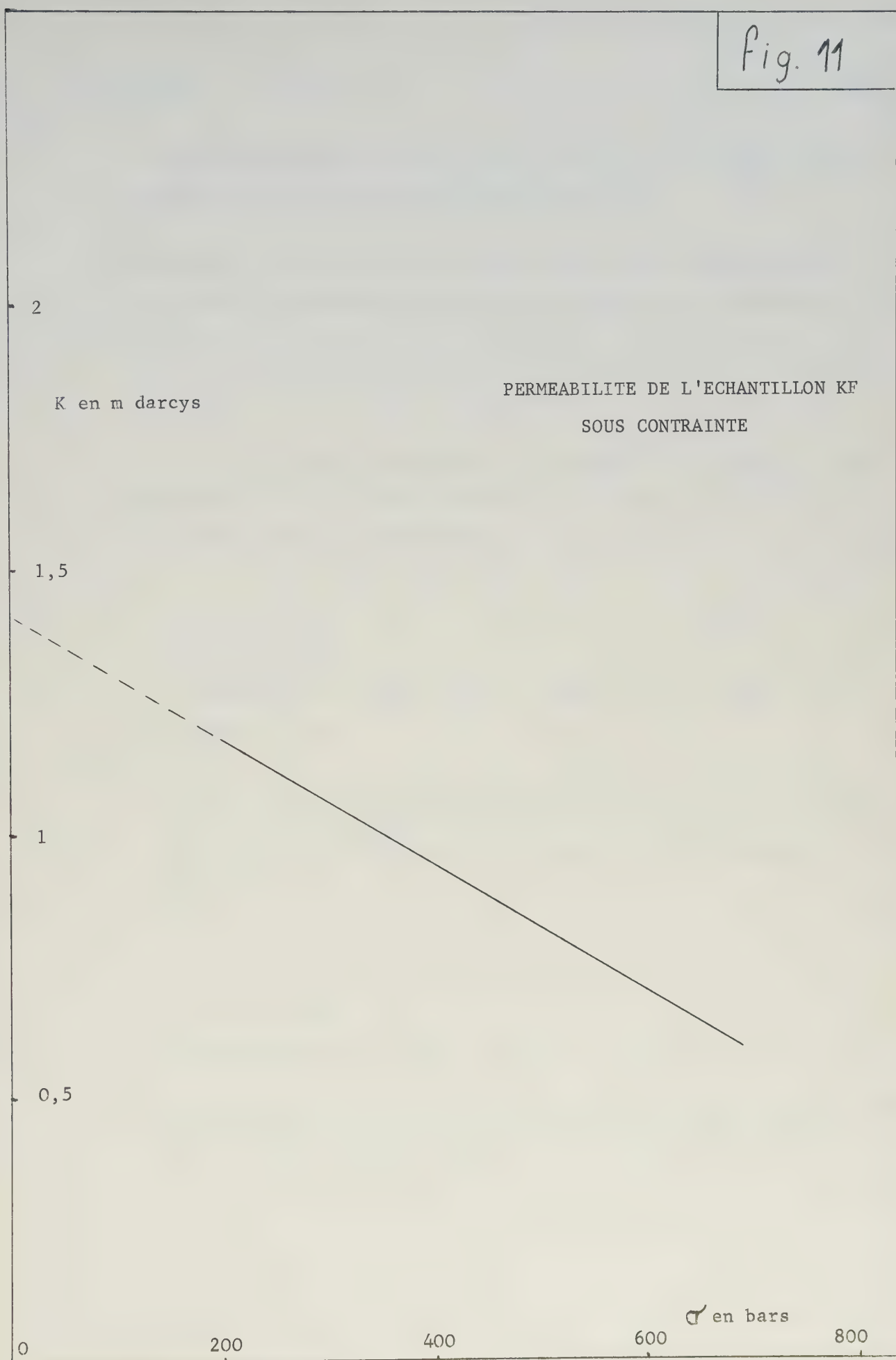
- Perméabilité liquide.

Le débit adopté est de 9,659 cc/heure.

Les courbes (fig. 12) montrent d'abord une décroissance assez rapide jusqu'à 300 bars, puis une linéarité jusqu'à 700 bars.

Pour une compression de 0 à 700 bars, on note une diminution de 35 % de la perméabilité à 70°C et 30 % à 90°C.

Fig. 11



Il faut remarquer que de 70°C à 90°C, on obtient au liquide une diminution de perméabilité plus marquée qu'à l'air.

Nous pourrions conclure de ce deuxième essai que le fluide saturant n'intervient pratiquement pas sur la diminution de la perméabilité en fonction de la contrainte σ . D'autre part la température a une influence sur la perméabilité absolue, mais a une importance bien moins grande quant à la variation de celle-ci.

Les temps de stabilisation ont été de l'ordre de une heure par point expérimental et nous n'avons pas noté d'hystérésis par rapport aux contraintes, puis aux températures.

c) Echantillon RO₁A

La température est fixée à 90°C, le débit de l'eau salée à 9,66 cc/heure.

Pour cet échantillon, les courbes montrent une décroissance assez uniforme de la perméabilité en fonction de la contrainte. Cette décroissance, pour σ variant de 0 à 500 bars, est d'environ 50 % (fig. 13).

d) Echantillon RO₂F

La température est de 90°C, le débit de l'eau salée 7,676 cc/heure.

Cet échantillon a beaucoup de caractéristiques communes avec l'échantillon précédent RO₁A. Il conserve cette similitude quant à la décroissance de la perméabilité.

Fig. 12

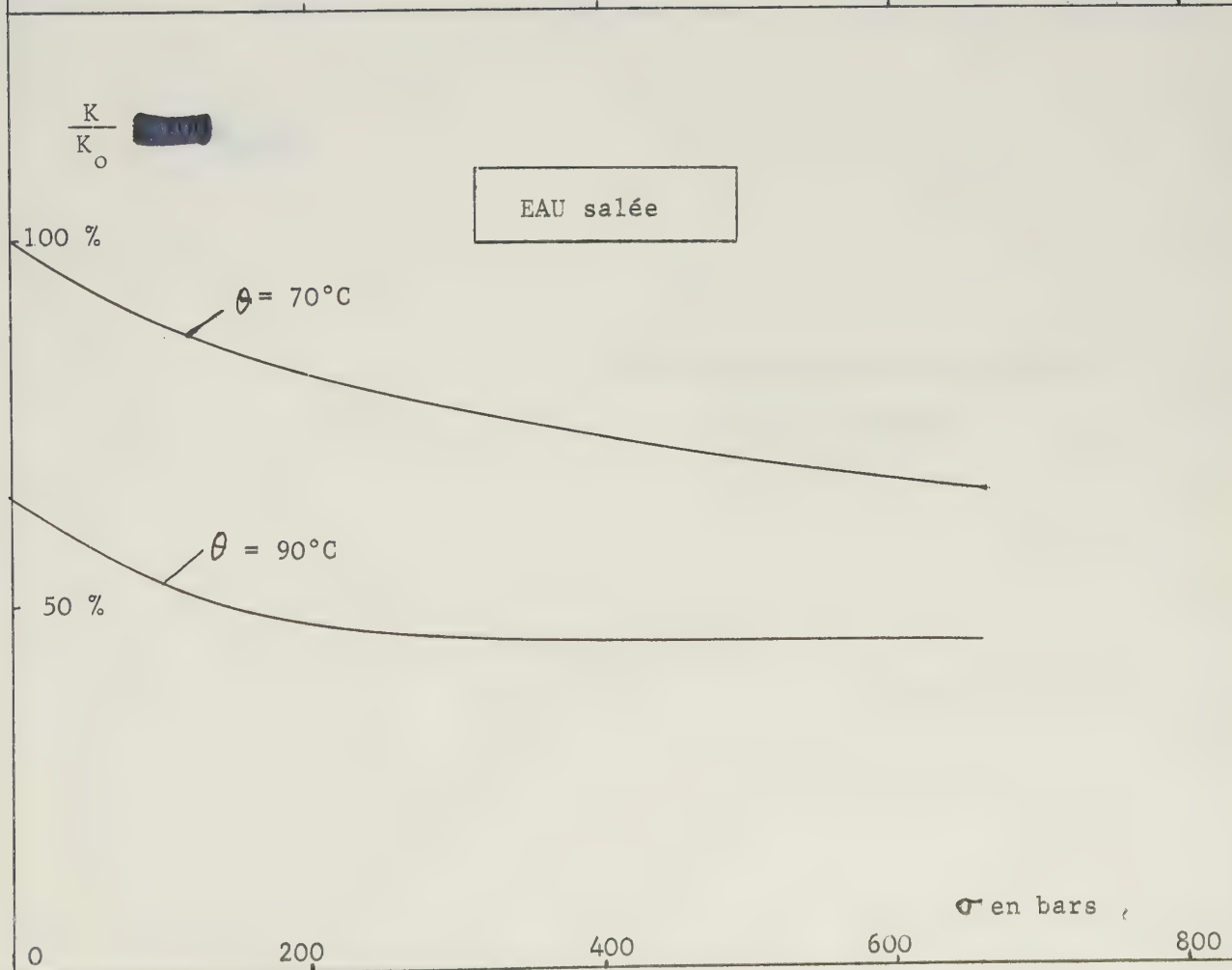
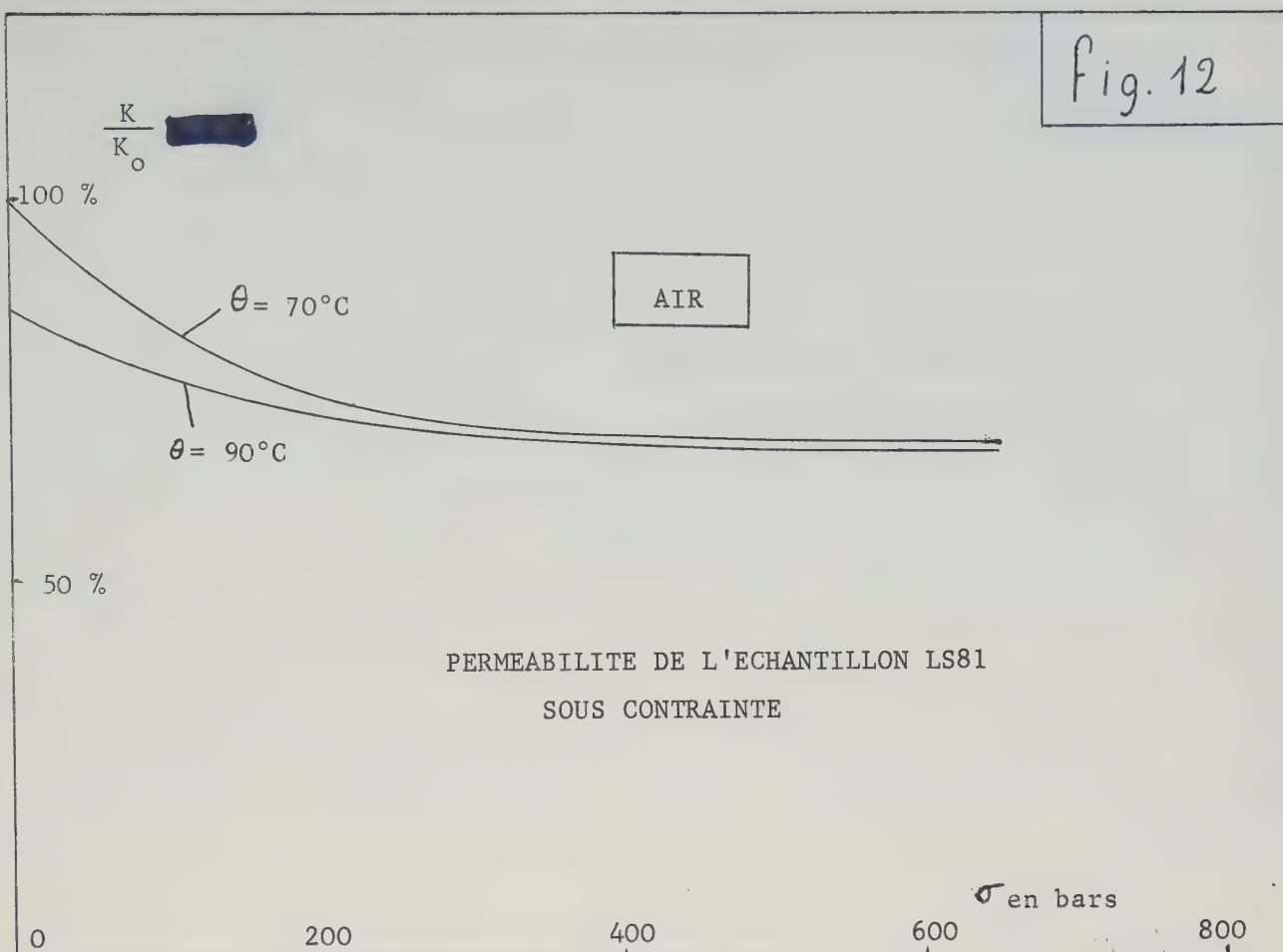




fig. 13

$$\frac{K}{K_0}$$

100

100 %

PERMEABILITE DE L'ECHANTILLON RO₁A
SOUS CONTRAINTE

50 %

0

200

400

600

800

σ en bars

$$\frac{K}{K_0}$$

100

100 %

PERMEABILITE DE L'ECHANTILLON RO₂F
SOUS CONTRAINTE

50 %

0

200

400

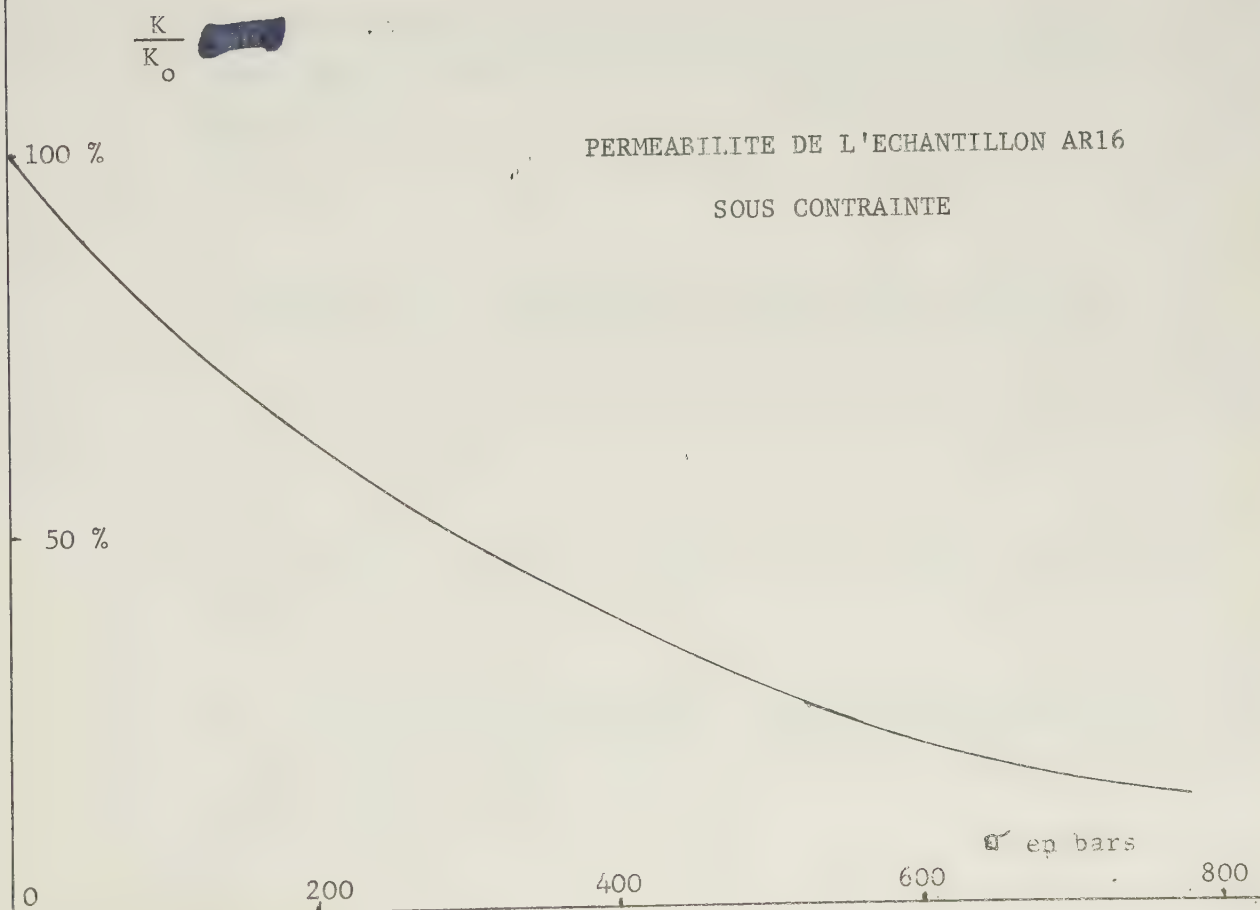
600

800

σ en bars



fig. 14





On constate que pour une augmentation de contrainte de 500 bars, la perméabilité va diminuer de 60 % (fig. 13).

e) Echantillon AR16 F45b

La température de cet essai est de 90°C. Au départ un débit liquide de 48,4 cc/heure a été fixé.

Aux premiers essais, la courbe de diminution de la perméabilité n'est pas apparue réversible ; les points trouvés se situaient très au-dessous de la première courbe tracée.

Nous en avons déduit que la stabilisation de l'état de compression de cet échantillon était longue à obtenir. Dans chaque mesure nous avons effectué alors des écoulements durant deux heures et là nous avons obtenu le graphe de la figure 14, qui lui était réversible.

Il apparaît ici une importante réduction de la perméabilité, puisque celle-ci diminue de 70 % pour une élévation de σ de 0 à 500 bars.

2) Variations de la perméabilité en fonction de la pression p

Ces essais ont pu être réalisés grâce à un régulateur de pression placé à l'aval de la carotte et qui permet un laminage continu de l'écoulement.

La contrainte externe σ appliquée a été en général celle régnant dans le gisement.

Les perméabilités au départ dans chaque cas ont été les mêmes que celles que nous avons enregistrées lors des essais précédents dans les mêmes conditions.

a) Echantillon LS81

La température est fixée à 70°C et la contrainte externe à 500 bars.

La courbe obtenue sur la figure 15 montre une augmentation très progressive de la perméabilité. Toutefois quand p varie de 0 à 400 bars, celle-ci est presque doublée.

b) Echantillon RO₁A

La température est égale à 90°C et la contrainte externe à 450 bars.

La courbe obtenue (fig. 16) est semblable à celle obtenue pour l'échantillon LS81. La perméabilité double lorsque p passe de 0 à 500 bars.

c) Echantillon RO₂F

Les conditions de contrainte et de température sont les mêmes que pour l'échantillon RO₁A.

La figure 16 montre la comparaison entre ces deux roches. On voit que la similitude est très marquée.

d) Echantillon AR16 F45b

Les conditions de gisement sont reproduites ; la température est de 90°C et la contrainte externe est égale à 600 bars.

La courbe de la figure 17 montre une progression assez lente jusqu'à 120 bars, mais ensuite la perméabilité augmente dans des proportions considérables.

Fig. 15

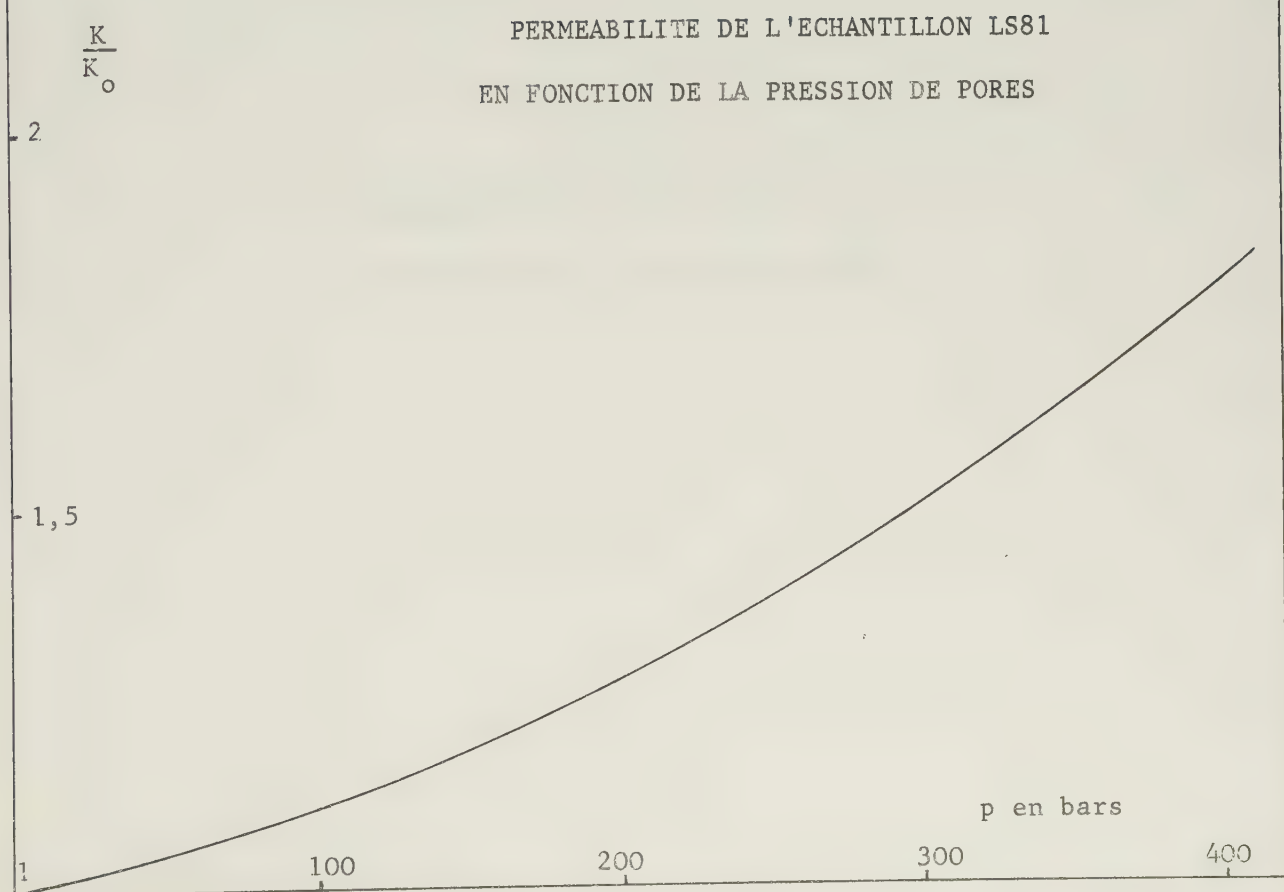


Fig. 16

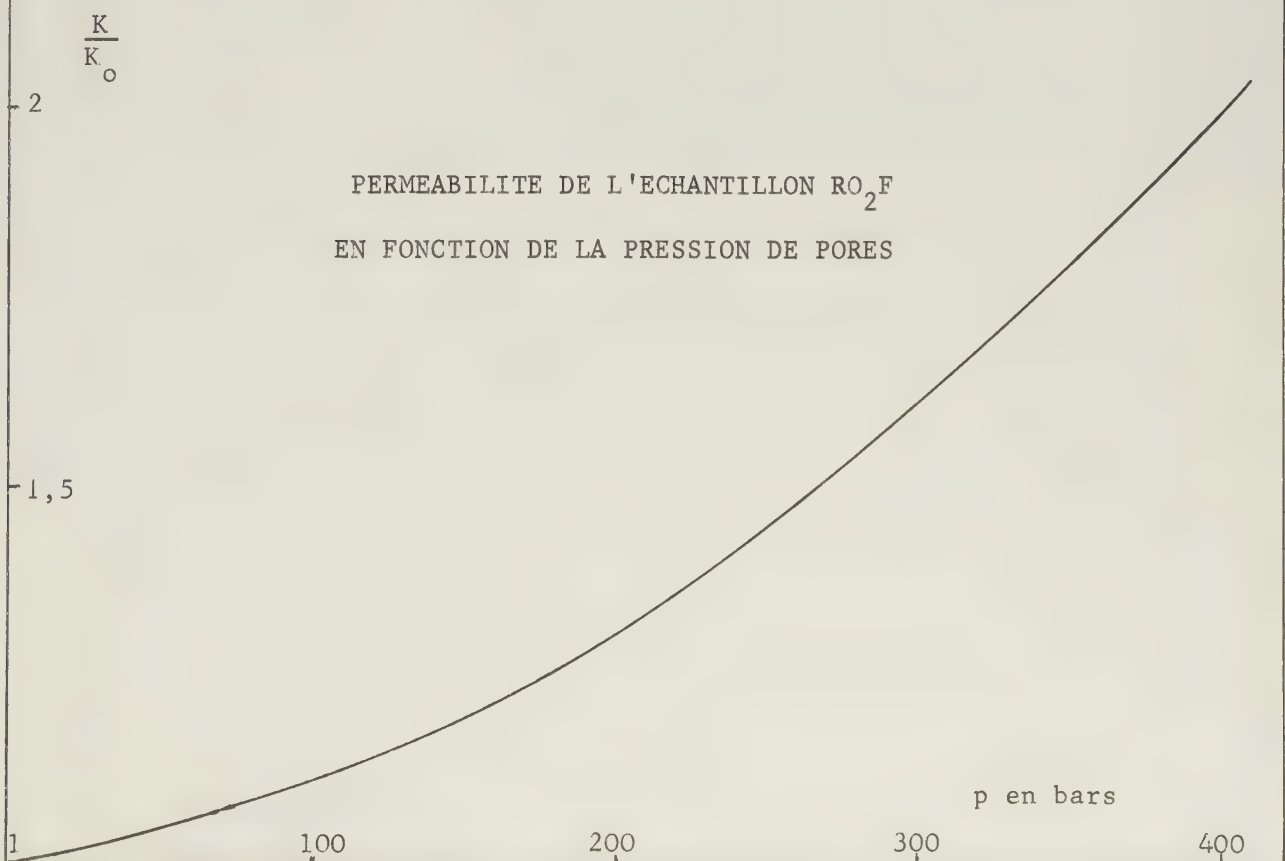
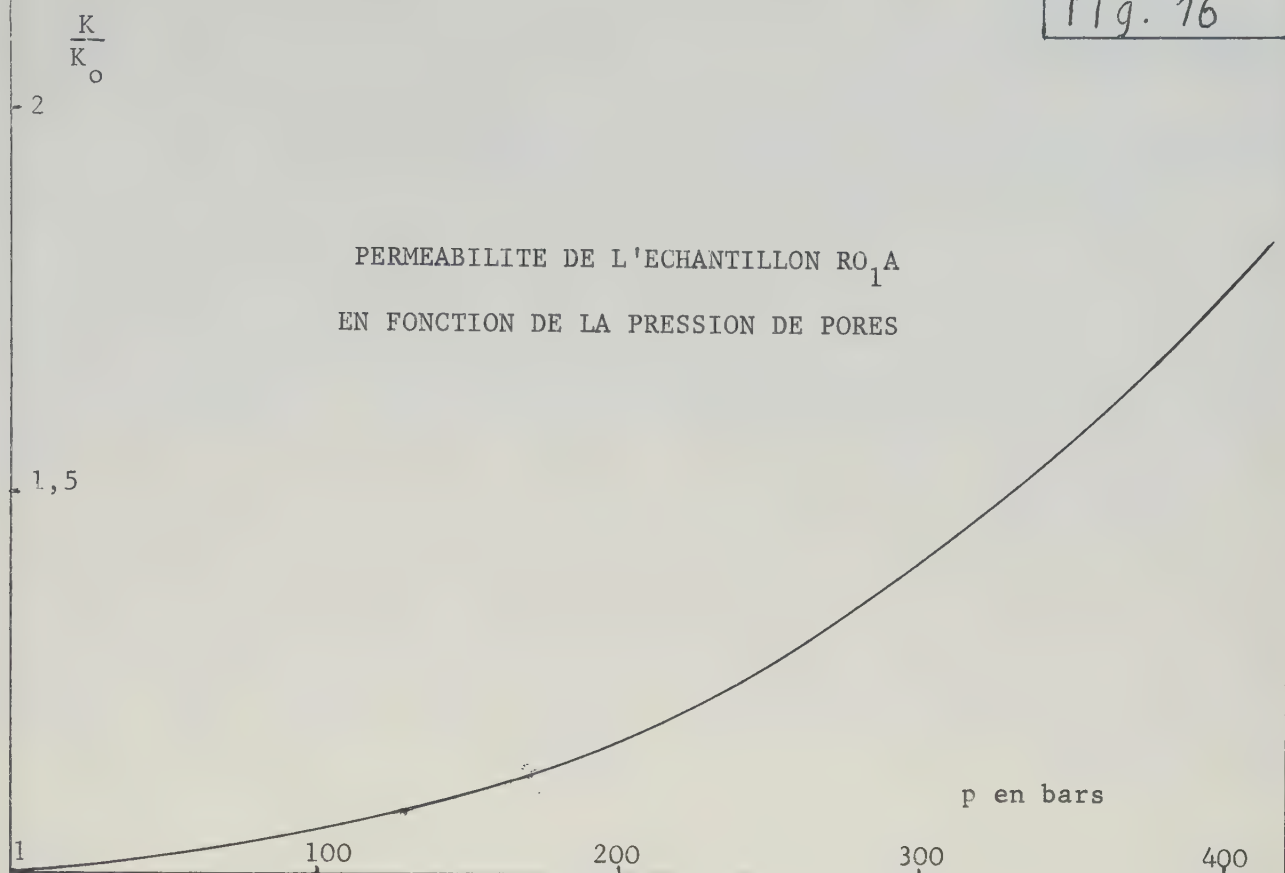
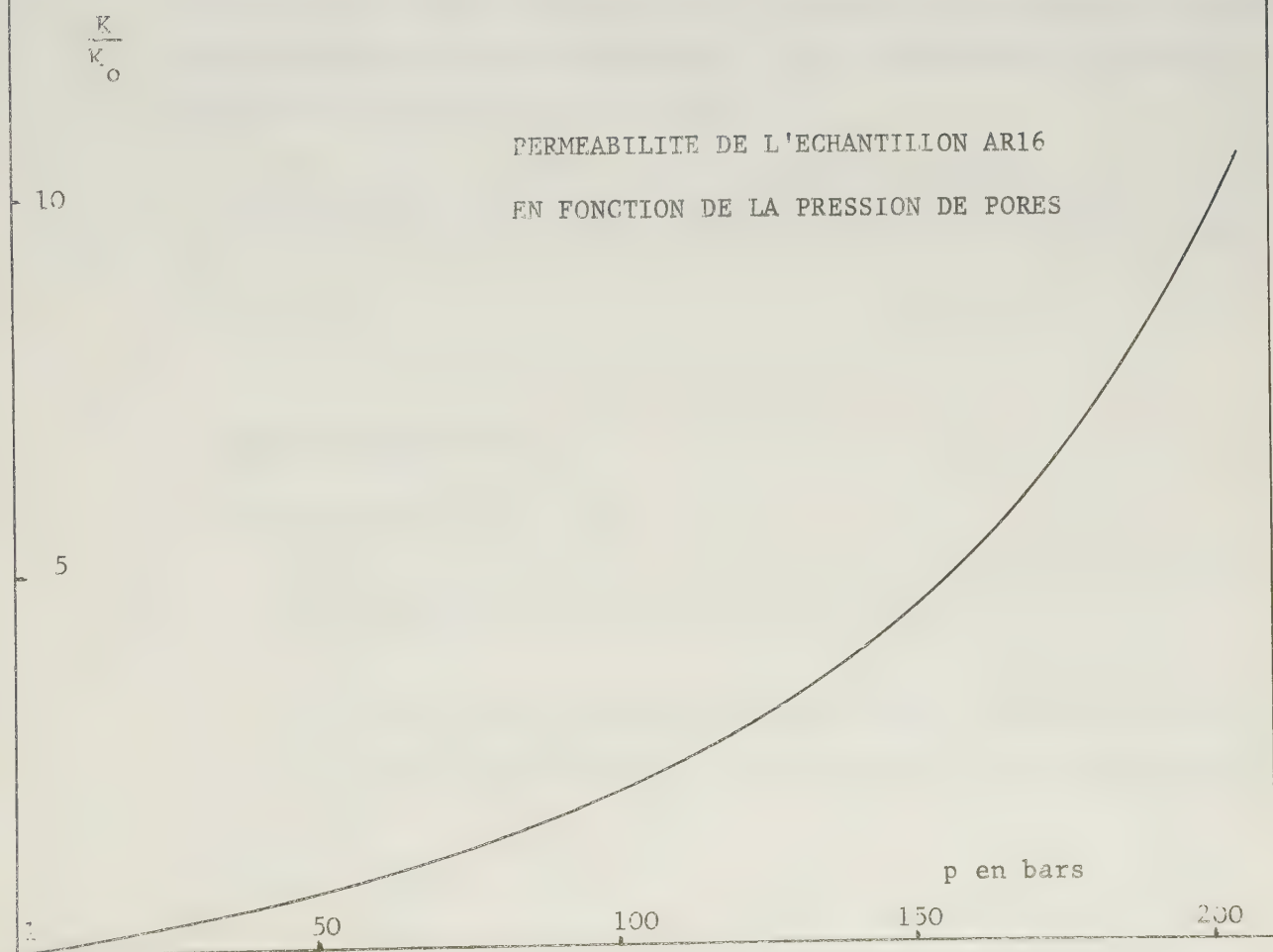


Fig. 17



Nous avons arrêté l'expérience à 170 bars, car une augmentation de la pression de pores aurait conduit à la fracturation de la roche.

D - MESURES DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE DE PORES

Les mesures portent sur des variations de volume. Les courbes seront portées sur un repère ayant en abscisse les pressions et en ordonnées les variations de volume relevées ΔV_p .

Par convention nous noterons négativement les volumes ΔV_p retirés et positivement les volumes injectés.

Les points de départ des courbes sont fixés arbitrairement sur l'axe des ordonnées, car l'échelle ΔV_p est relative. C'est surtout la pente de ces courbes qui est intéressante, ce qui explique que l'on utilise une échelle des volumes très dilatée.

De plus pour des commodités de comparaisons, les courbes correspondant aux essais de compression et de production seront tracées sur le même graphe.

1) Essais de compression

a) Echantillon KF 2/4 4AX

Cet essai est réalisé pour une pression de pores p constante et égale à 20 bars et une température $\theta = 130^\circ\text{C}$.

Pour chaque palier de pression, on maintient constante la pression interne en retirant un certain volume d'eau salée au moyen

de la pompe graduée au millimètre cube.

Pour chaque palier de 100 bars de la pression σ , nous avons observé un temps de stabilisation de 20 à 30 minutes.

Nous obtenons un graphe (fig. 18) $\Delta V_p = f(\sigma)$ linéaire, ce qui traduit que le coefficient de compressibilité est constant dans la gamme de contraintes considérée.

$$C_p = \frac{1}{V_{po}} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta \sigma}$$

Le volume de pores de référence étant $V_{po} = 27,5$ cc on en déduit :

$$C_p = - 70 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

b) Echantillon LS81 - Influence de la température

Nous avons réalisé ces essais pour trois températures 70, 100 et 130°C. La pression interne que nous avons maintenue au cours des mesures est $p = 30$ bars. Toutefois nous avons réalisé un essai avec $p = 50$ bars et les résultats ont été identiques.

Les graphes obtenus (fig. 19) $\Delta V_p = f(\sigma)$ sont linéaires. L'hystérésis est pratiquement inexistant.

Le volume de référence étant égal à 107,2 cc on trouve :

à $\theta = 70^\circ\text{C}$	$C_p = - 45 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$
à $\theta = 100^\circ\text{C}$	$C_p = - 50 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$
à $\theta = 130^\circ\text{C}$	$C_p = - 62,4 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$

Nous reportons ces résultats en fonction de la température pour voir l'influence de cette dernière (fig. 20).

c) Echantillon RO₁A

La température de l'expérience est égale à 90°C.

Comme nous l'avions précisé précédemment, ces essais sont faits pour plusieurs valeurs de p, pression de pores. Nous obtenons donc un réseau de courbes.

Les courbes obtenues (fig. 21) montrent que l'on n'a plus une variation linéaire comme dans le cas des calcaires KF 2/4 4AX et LS81.

Donc le coefficient de compressibilité sera une fonction de σ .

d) Echantillon RO₂F

Les conditions de température et les gammes de pression sont les mêmes que dans l'expérience précédente.

Les courbes de la figure 22 montrent d'ailleurs une parfaite similitude avec celles de la figure 21, concernant l'échantillon RO₂F.

Dans les deux cas, le temps de stabilisation de chaque point expérimental a atteint environ 24 heures.

2) Essais de production

a) Echantillon KF 2/4 4AX

Cet essai est réalisé pour une pression externe σ de 500 bars.
Comme pour l'essai de compression le temps de stabilisation a été d'environ 30 minutes.

Le graphe obtenu (fig. 18) est également linéaire mais de pente différente.

L'expression du coefficient de compressibilité étant :

$$C'_p = \frac{1}{V_{po}} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta p}$$

on trouve :

$$C'_p = 133.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

b) Echantillon LS81 - Influence de la température

Ces essais sont réalisés pour une contrainte externe $\sigma = 700$ bars.

Nous les avons effectués aux températures de 70°C, 100°C et 130°C.

Les courbes de la figure 19 montrent une variation linéaire.

Les coefficients de compressibilité sont donc des constantes.

Leur calcul conduit aux résultats suivants :

$\theta = 70^\circ\text{C}$	$C'_p = 127.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$
$\theta = 100^\circ\text{C}$	$C'_p = 131.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$
$\theta = 130^\circ\text{C}$	$C'_p = 146.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$

Fig. 18

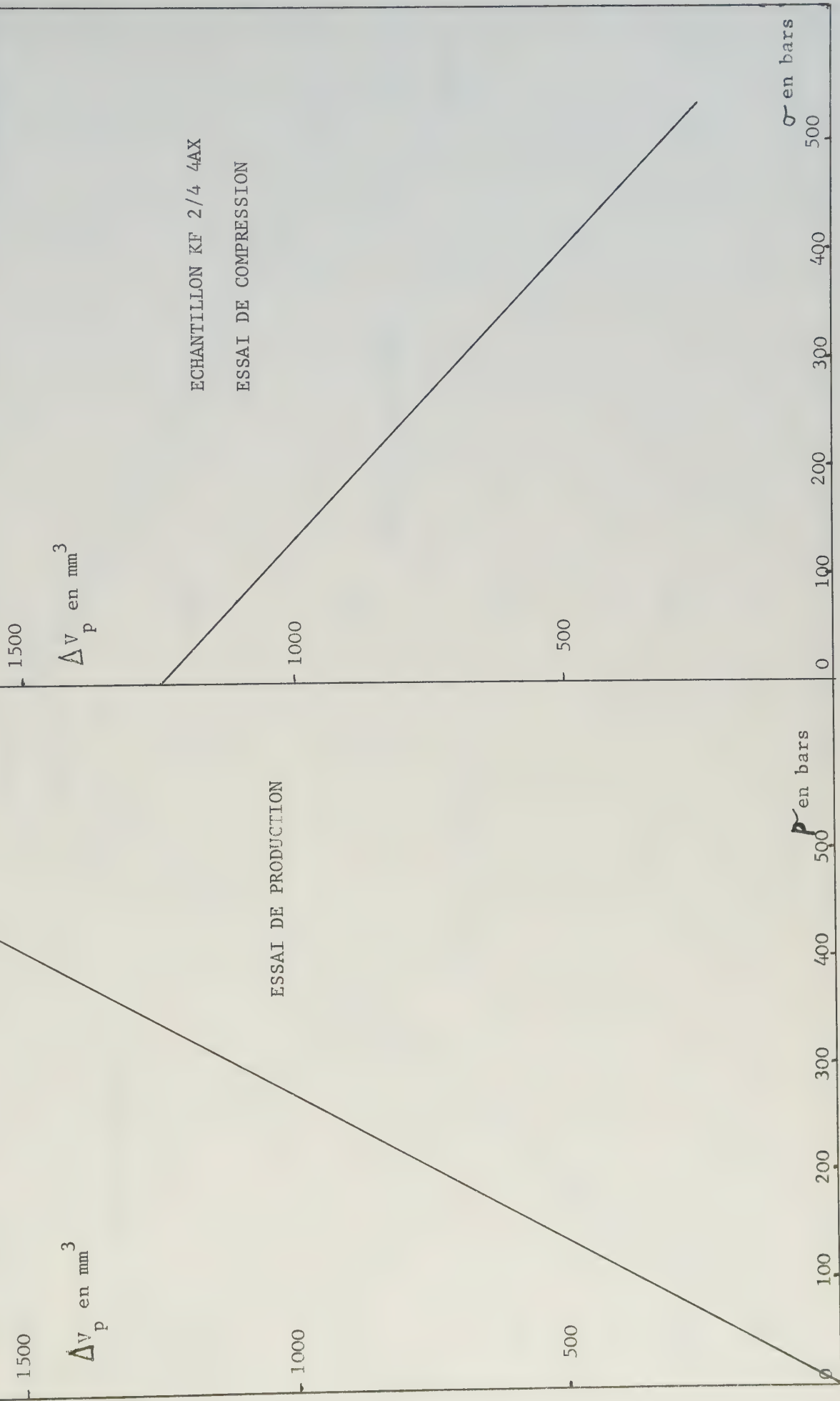


Fig. 19

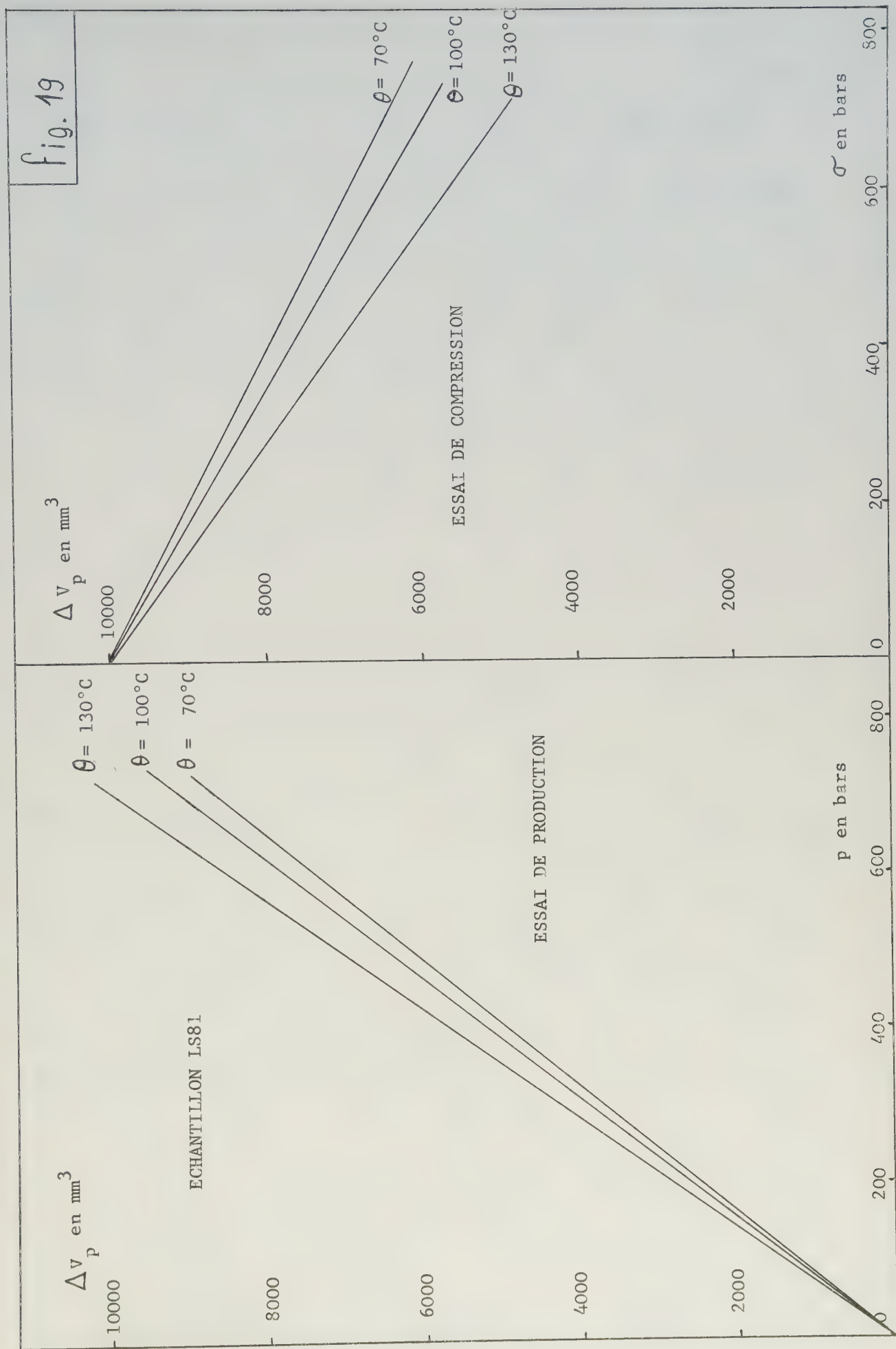


fig. 20

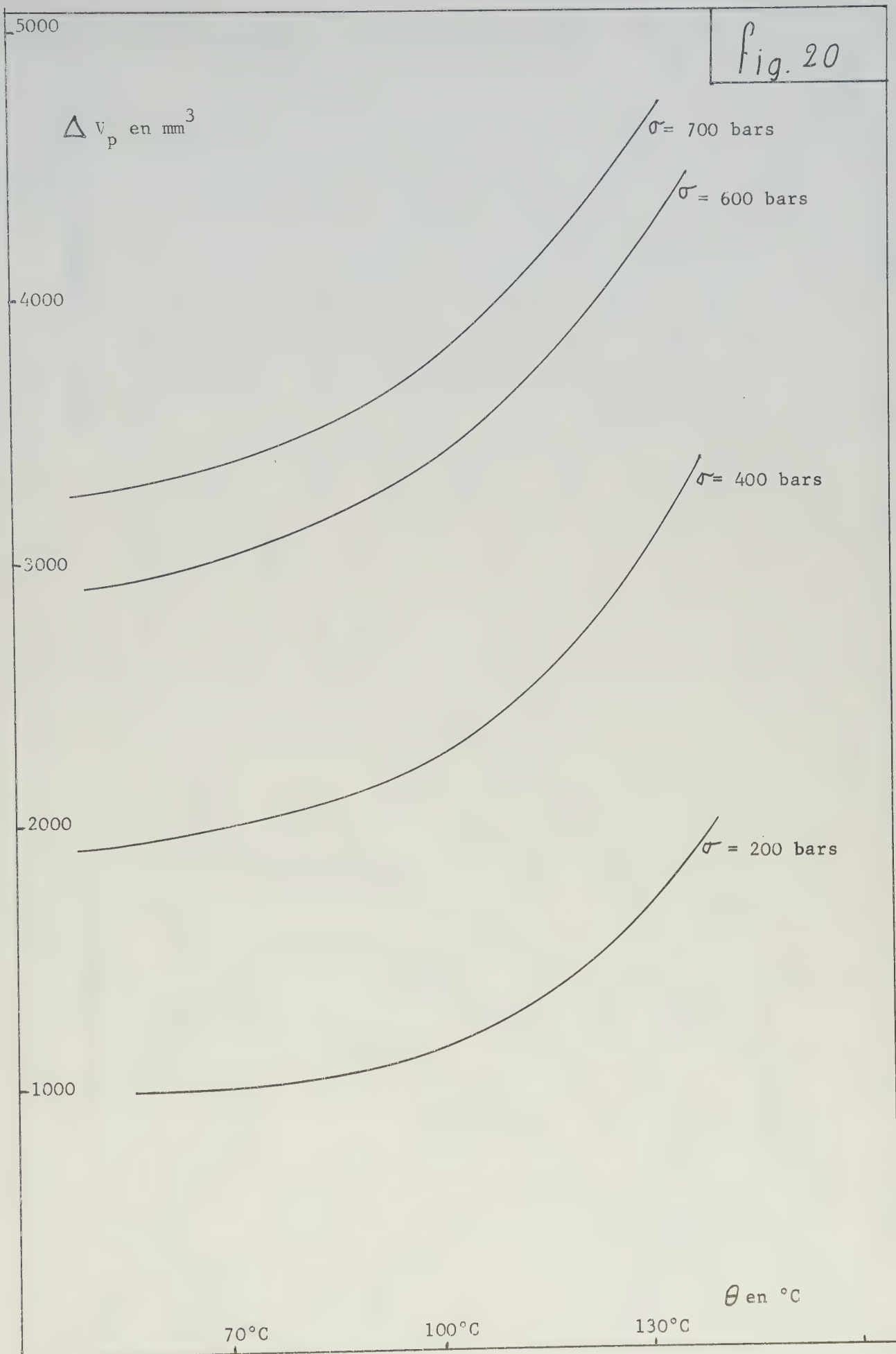
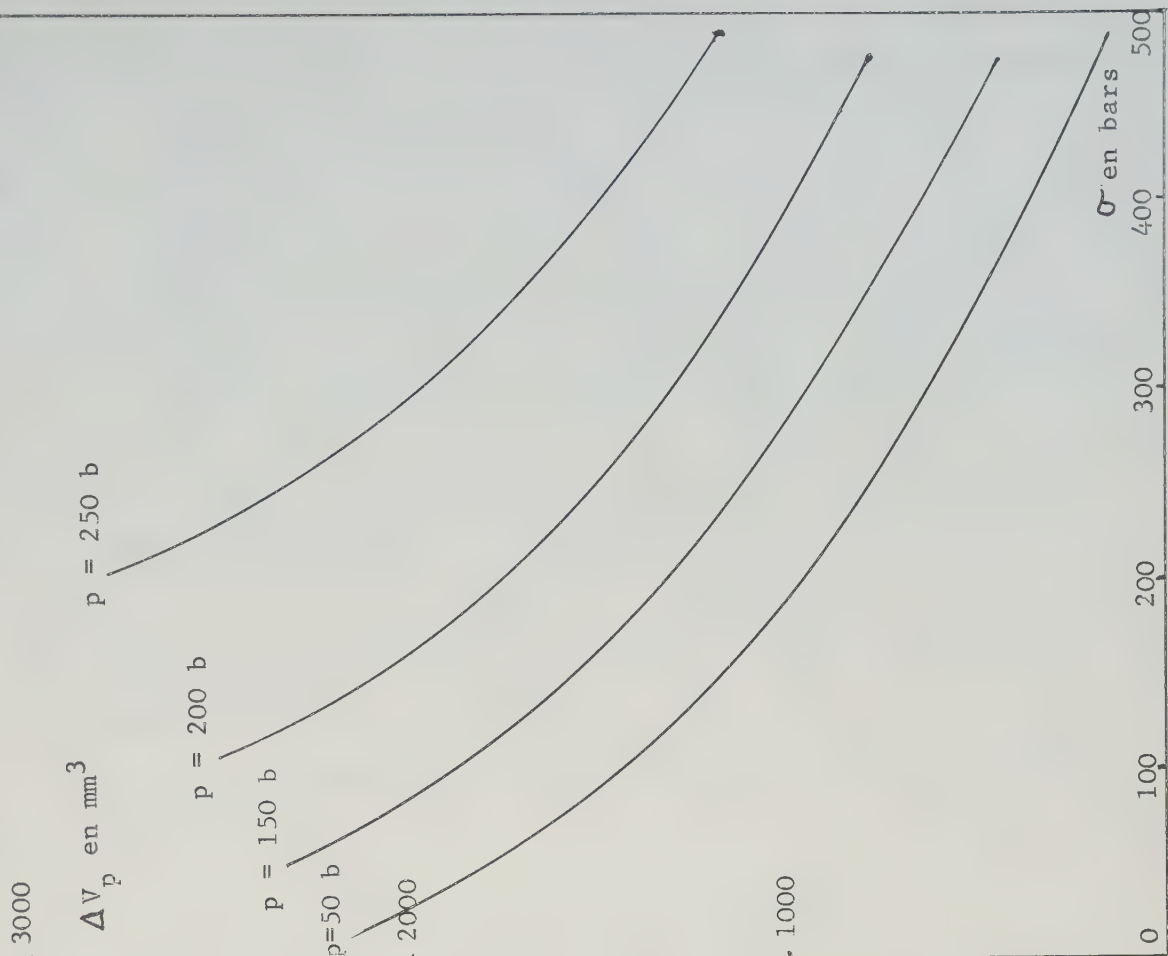
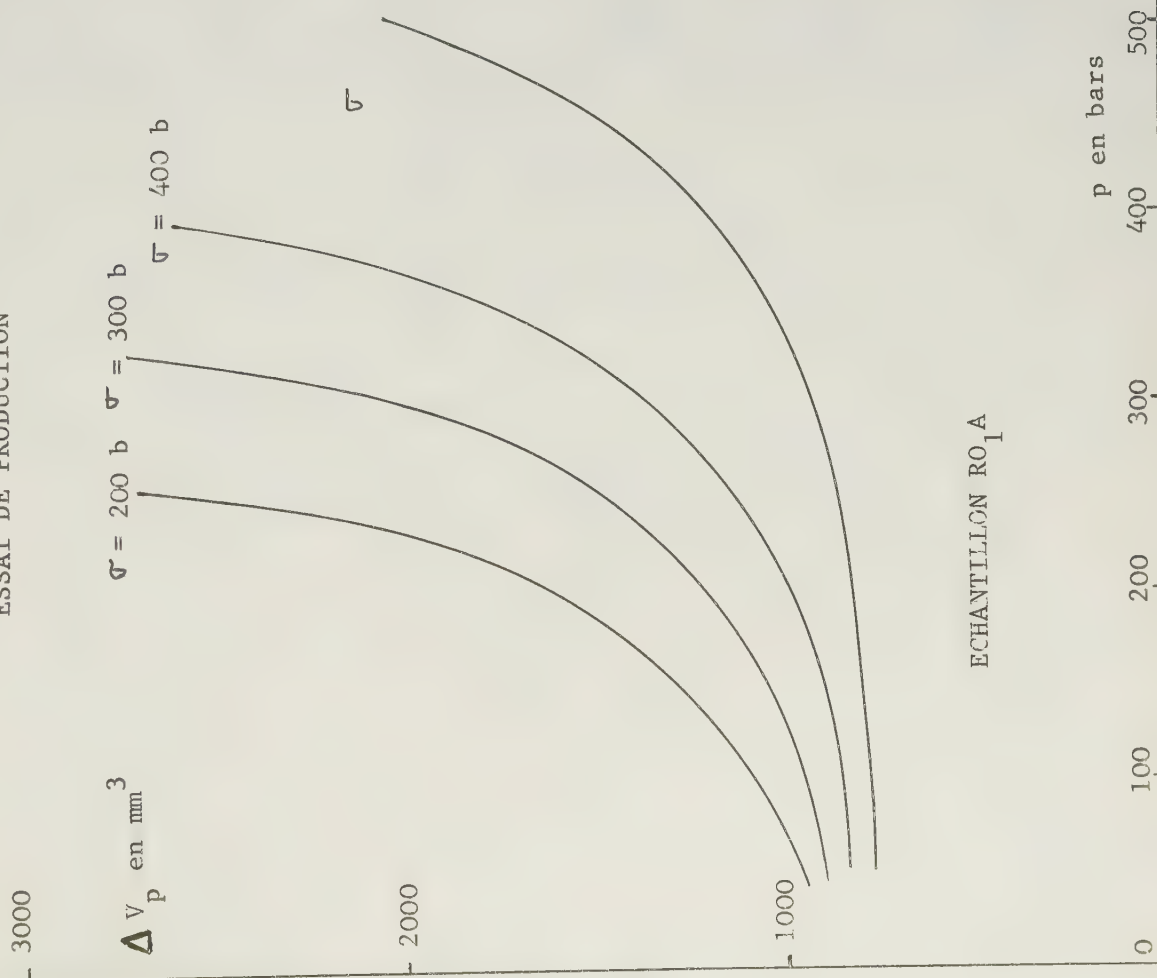


Fig. 21

ESSAI DE COMPRESSION



ESSAI DE PRODUCTION



ECHANTILLON RO₁A

fig. 22

ECHANTILLON RO₂F

ESSAI DE PRODUCTION

ΔV_p en mm³

6000

5000

4000

3000

2000

1000

$\sigma = 200$ b

$\sigma = 300$ b

$\sigma = 400$ b

$\sigma = 500$ b

p en bars

100

200

300

400

500

ΔV_p en mm³

5000

5000

4000

3000

2000

1000

p = 100 b

p = 150 b

p = 200 b

p = 250 b

σ en bars

100

200

300

400

500

ESSAI DE COMPRESSION

c) Echantillon RO₁A

Les essais sont effectués pour plusieurs valeurs de σ .

La figure 21 montre une famille de courbes dont l'allure diffère assez nettement de celle des courbes de compression.

Par ailleurs les variations de volume ne sont pas linéaires et C'_p sera une fonction de p .

d) Echantillon RO₂F

Les conditions d'expérience sont les mêmes que pour l'échantillon précédent.

La figure 22 indique que C'_p dépendra également de p .

Nous reprendrons dans le chapitre des interprétations les résultats des deux derniers échantillons.

E - MESURES DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE SOLIDE

Il s'agit dans ces expériences de mesurer les variations de volume de la matière solide qui constitue le squelette de la roche.

Le coefficient de compressibilité solide s'exprime par :

$$C_s = \frac{1}{V_s} \cdot \frac{\Delta V_s}{\Delta p}$$

a) Echantillon KF 2/4 4AX

Après avoir tracé le graphe $dV = f(p)$, on trace la courbe de compressibilité de l'eau à 90°C, la différence de ces deux courbes va nous donner la compressibilité solide (fig. 23).

Cette variation est à peu près linéaire.

Le volume solide de référence étant $V_{so} = 54$ cc, nous trouvons :

$$C_s = 30.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

Cette valeur peut paraître élevée, mais il faut considérer que le volume de référence solide est assez petit et l'imprécision en est d'autant plus grande.

b) Echantillon LS81

La figure 24 montre une diminution linéaire en fonction de la pression p .

Le volume solide étant égal à 421 cc, le coefficient de compressibilité est égal à :

$$C_s = 7.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

Fig. 23

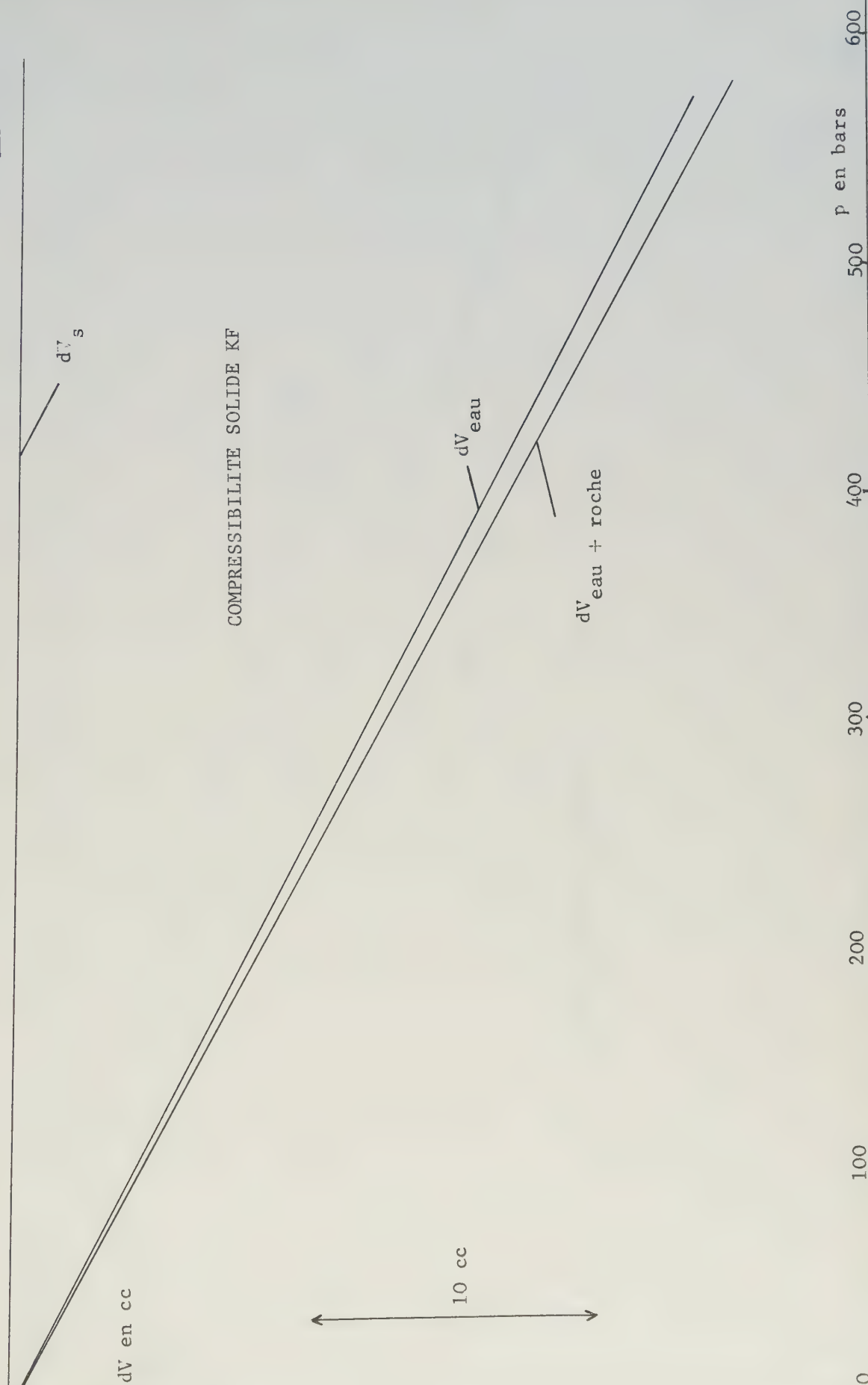


Fig. 24

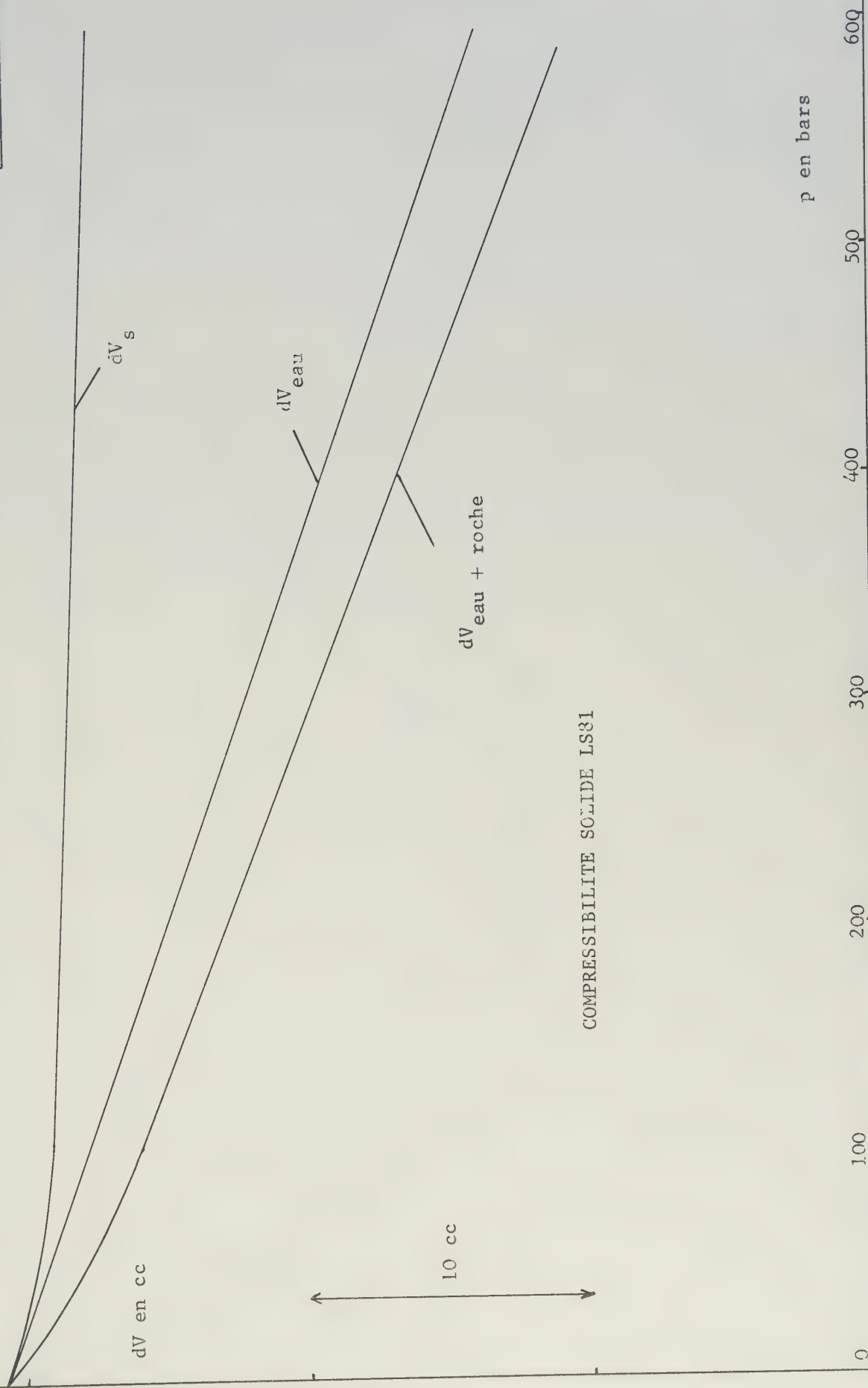


Fig. 25

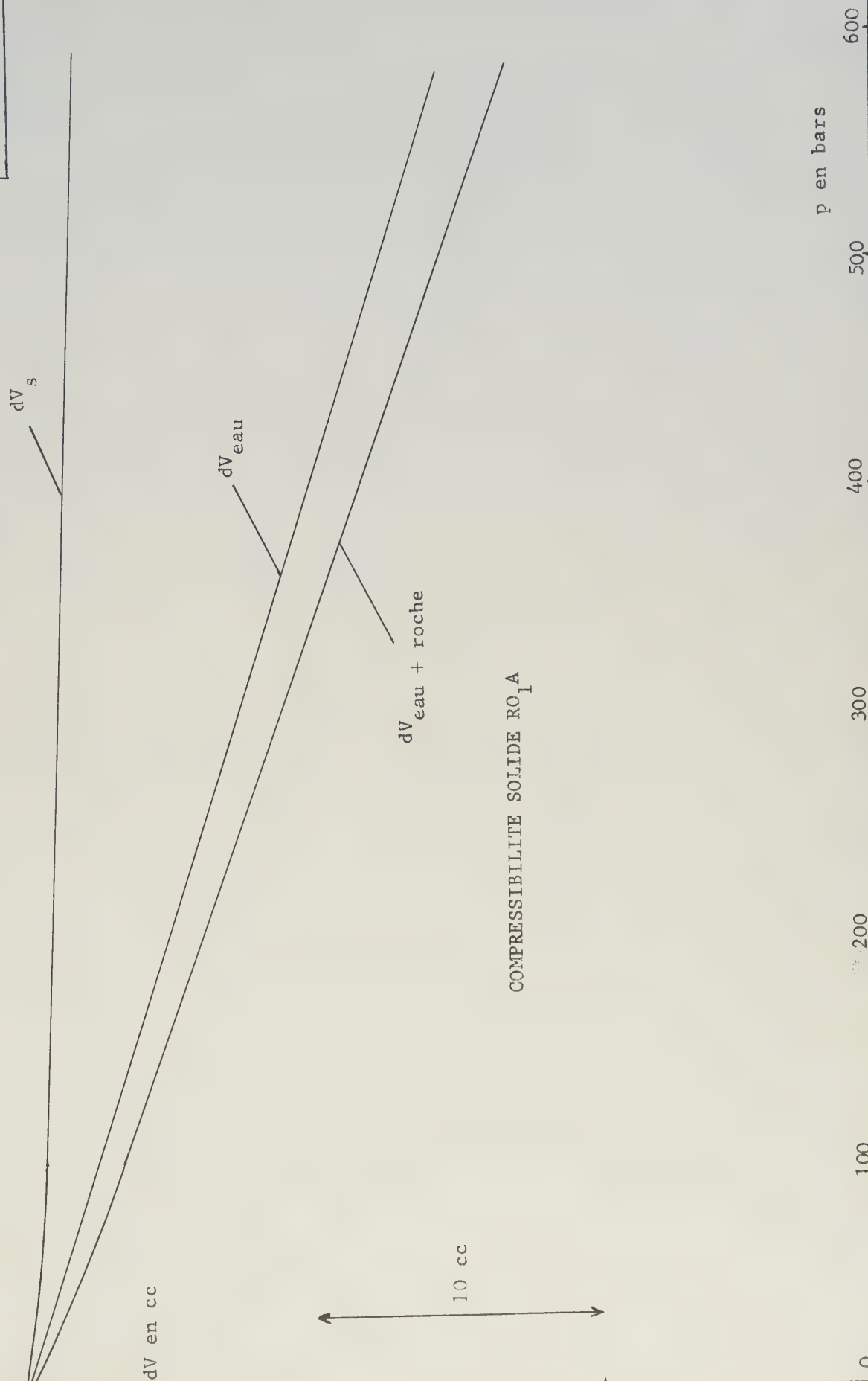
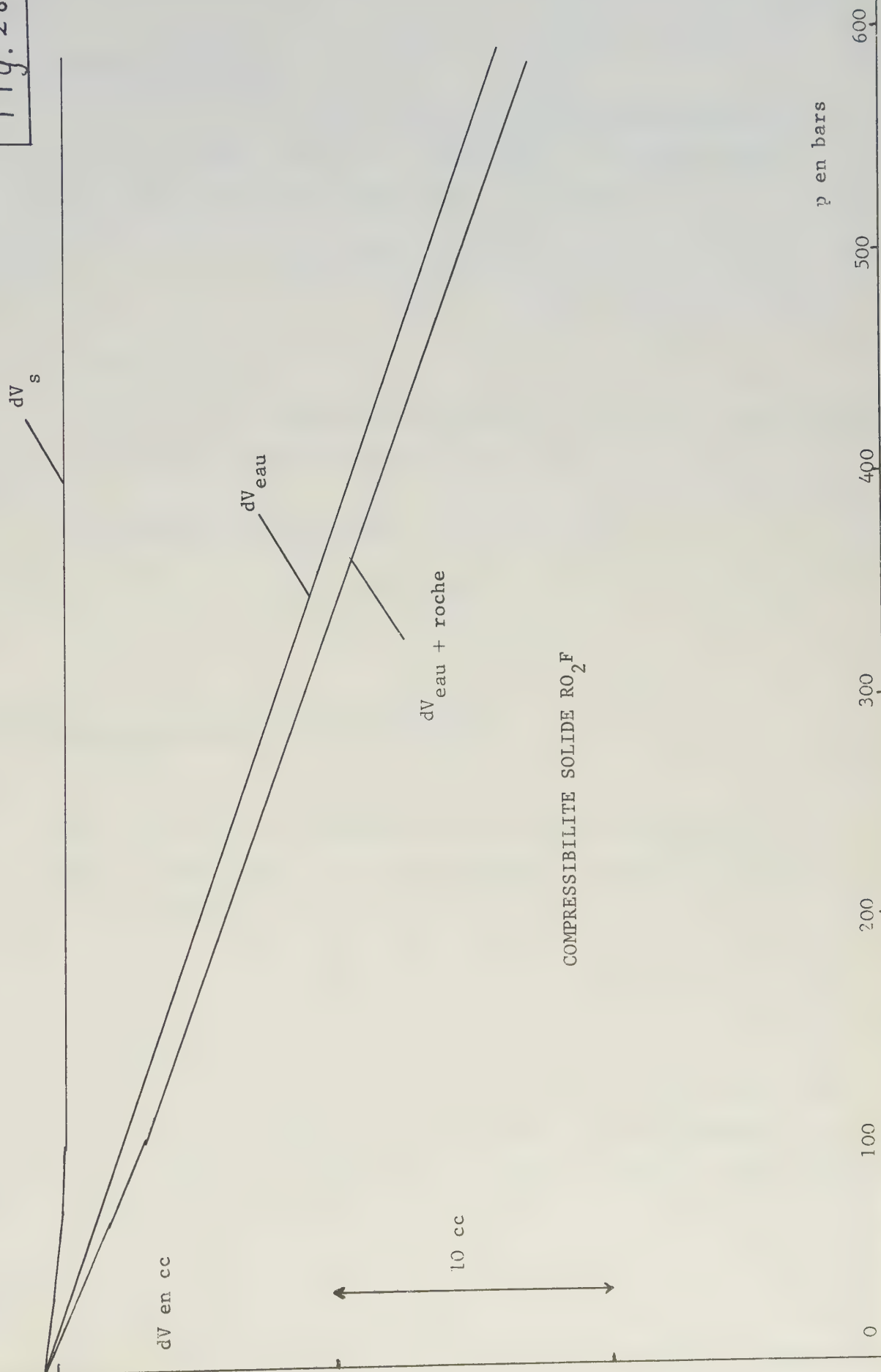


Fig. 26



c) Echantillon RO₁A

La diminution du volume solide est linéaire de 100 à 500 bars (fig. 25). Nous calculons le coefficient C_s dans cette gamme. Le volume solide étant égal à 494 cc, on trouve :

$$C_s = 5,06.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

d) Echantillon RO₂F

Comme tous les échantillons précédents, la courbe est linéaire pour une importante plage de pression (fig. 26)

Le volume solide étant égal à 426 cc, on trouve :

$$C_s = 3,5.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

F - MESURES DES CONDUCTIVITES ELECTRIQUES

Ces mesures n'ont été possibles que pour les échantillons RO₁A et RO₂F. En effet jusque là de gros problèmes d'isolement électrique ont dû être résolus.

a) Echantillon RO₁A

Les mesures effectuées pour les fréquences de 200Hz, 2KHz et 20KHz sont lues sur un impédancemètre, en fonction de la contrainte et pour différentes valeurs de p. La roche est toujours saturée d'eau salée à 50 g/l de NaCl.

Fig. 27

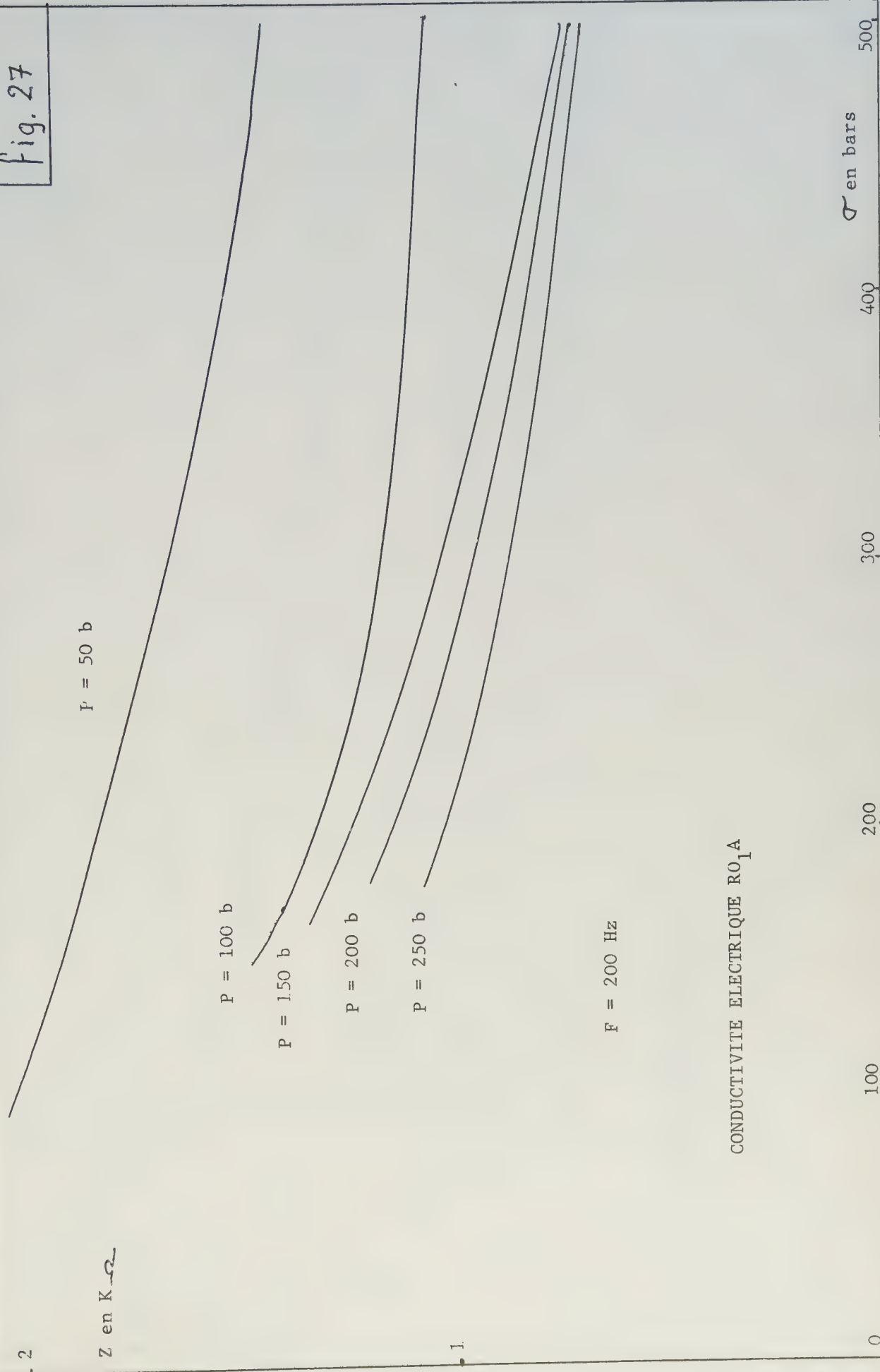


Fig. 28

Z en K Ω

P = 50 b

P = 100 b

P = 150 b

P = 200 b

P = 250 b

F = 2KHz

CONDUCTIVITE ELECTRIQUE σ_1 A

σ en bars

0 100 200 300 400 500



Fig. 29

2

Z en KΩ

1

P = 50 b

P = 100 b

P = 150 b

P = 200 b

P = 250 b

F = 20 KHz

CONDUCTIVITE ELECTRIQUE σ_1 A

σ en bars

500

400

300

200

100

0

fig. 30

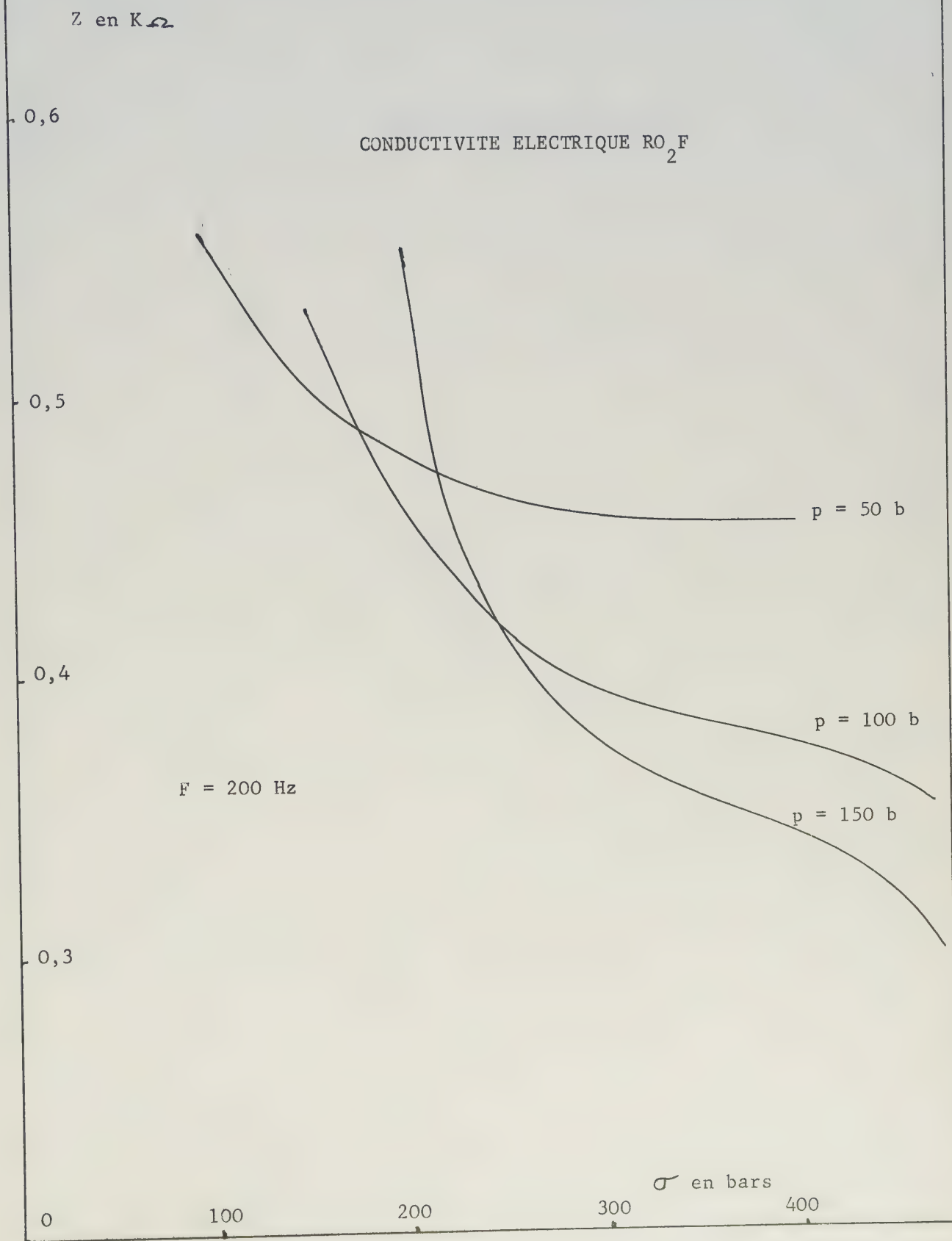


Fig. 31

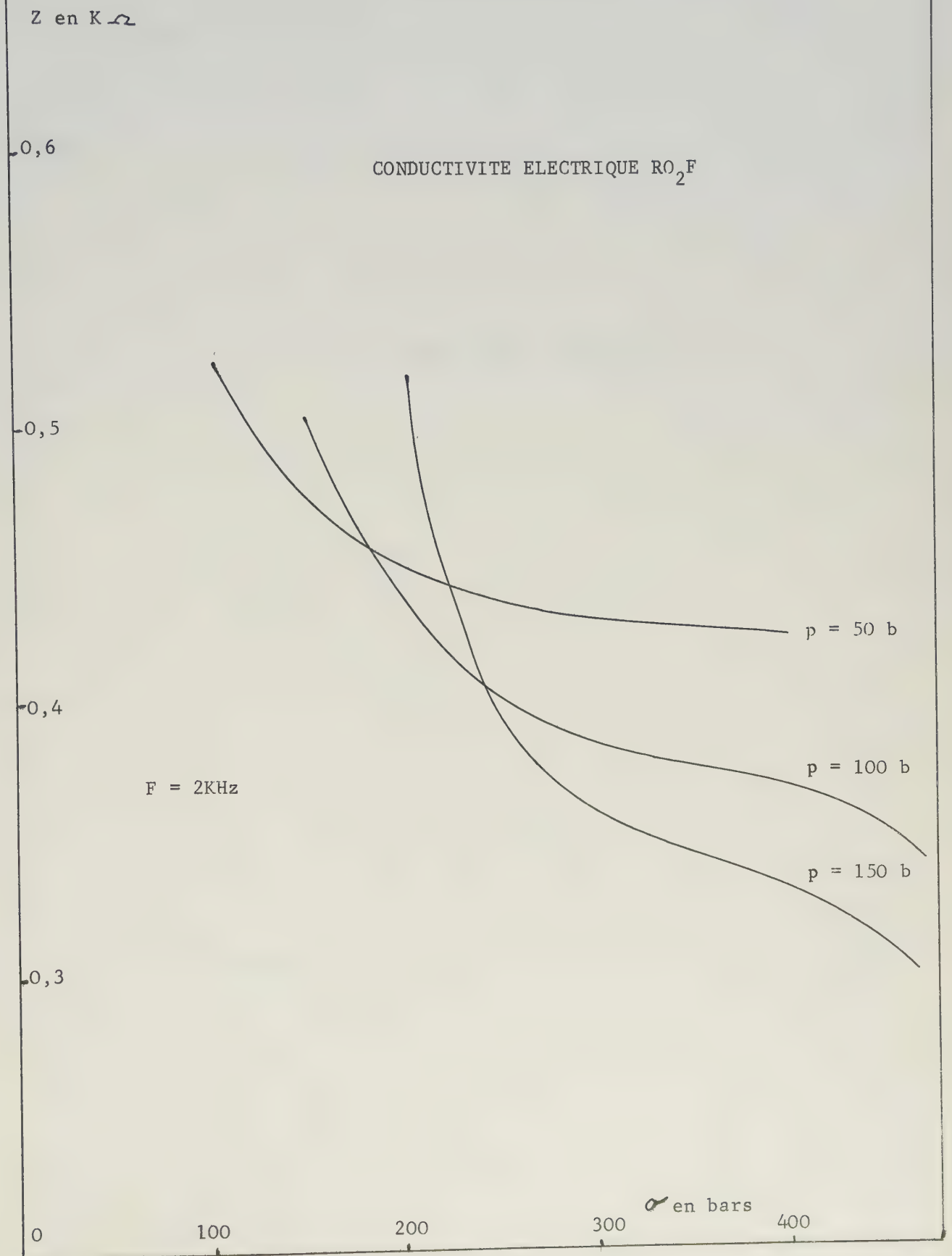


Fig. 32

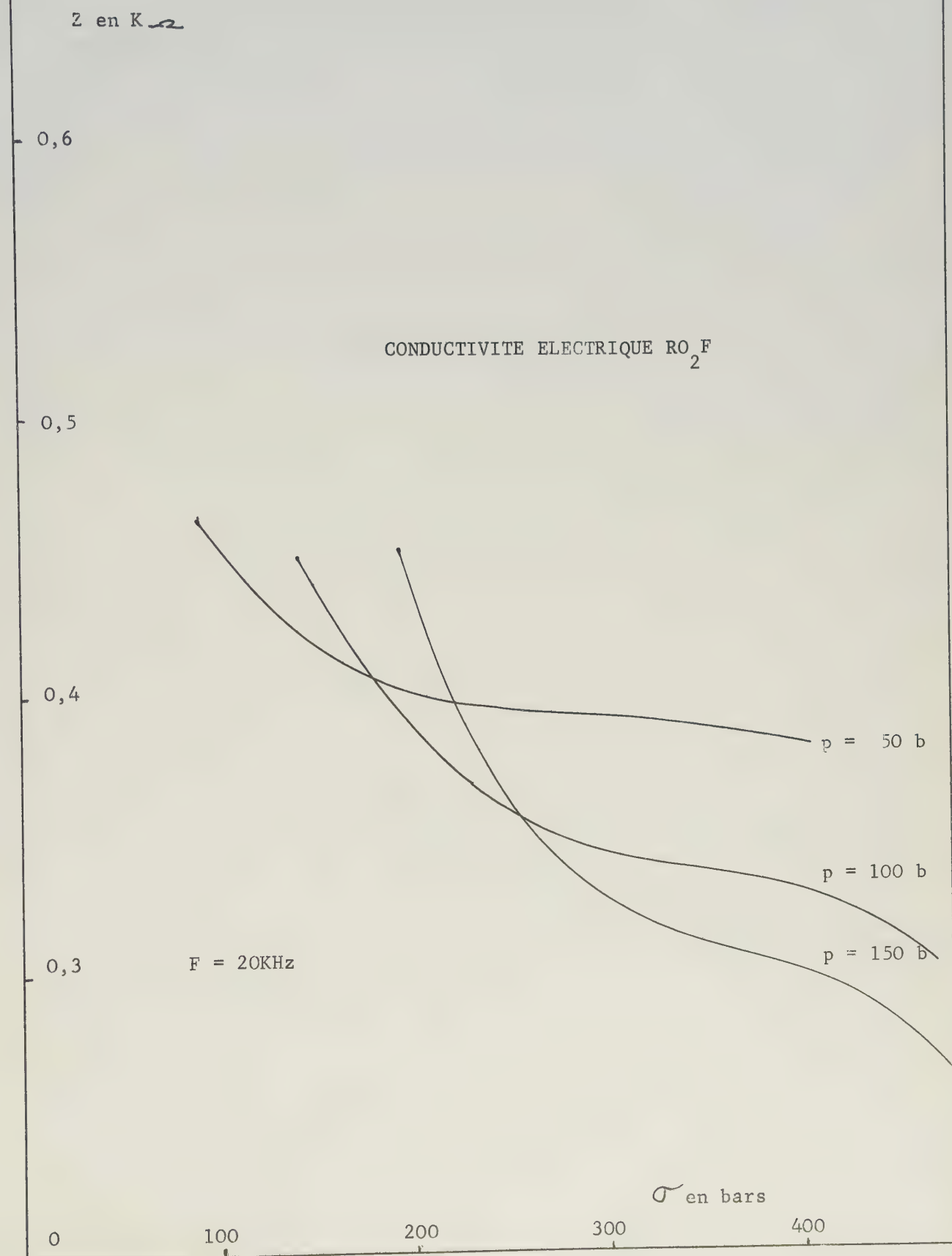
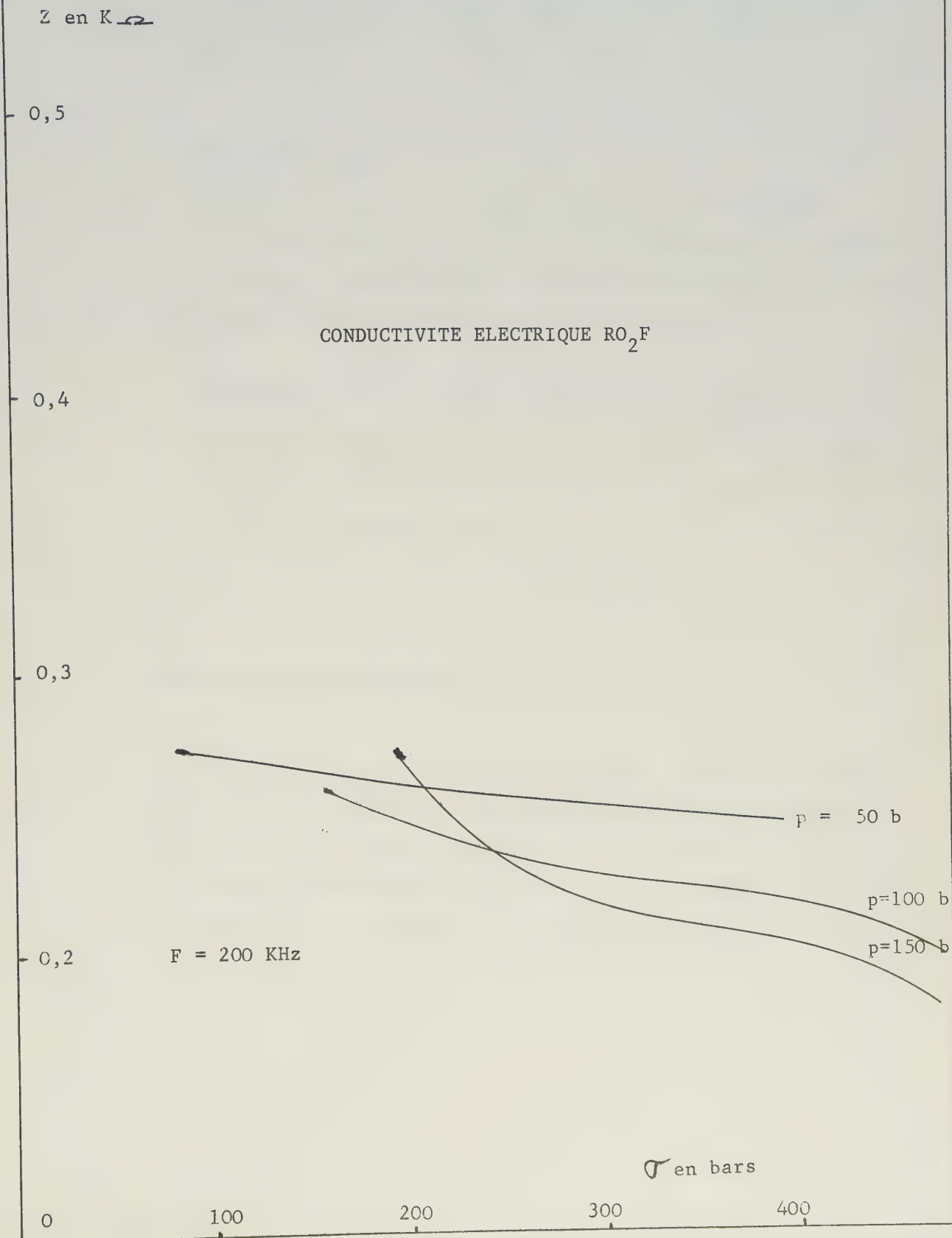


Fig. 33



Les figures 27, 28 et 29 montrent une diminution de l'impédance en fonction de σ qui tend à diminuer lorsqu'augmente la fréquence.

b) Echantillon RO_2F

Les mesures n'ont pu être faites que pour les pressions $p = 50, 100, 150$ bars mais nous voyons apparaître un phénomène intéressant (fig. 30, 31 32, 33). Aux alentours de 350 bars, on constate sur toutes les courbes un point d'inflexion.

Ce phénomène peut être lié à la présence de fissures ; la contrainte appliquée modifie la géométrie des fissures et il peut se produire des interconnexions qui font que la décroissance de l'impédance n'est plus uniforme, comme ce serait le cas pour un milieu exclusivement poreux.

G - MESURES DE LA DEFORMATION

Ces mesures se sont avérées très délicates, surtout en ce qui concerne les déformations de deux diamètres perpendiculaires du plan médian de la roche. Nous verrons en annexe de ce travail les recherches que nous avons effectuées afin d'essayer de déterminer les causes qui entravaient le déplacement des tiges au travers de la cellule.

a) Echantillon LS81

Nous n'avons pu déterminer que la variation de la longueur de cet échantillon ; les résultats sont portés dans la figure 34 en déformation absolue.

La déformation relative enregistrée lorsque σ varie de 0 à 700 bars atteint $2,5 \cdot 10^{-3}$. La température est de 100°C dans cette expérience.

b) Echantillon RO₁A

Ces mesures sont faites pendant les essais de compression à la température de 90°C . Nous avons noté les courbes pour chaque valeur de p. Il s'est avéré que celles-ci étaient parallèles, donc que la déformation était indépendante de p.

Nous avons reporté la courbe moyenne sur la figure 35, en déformation absolue. Notons qu'en déformation relative, nous obtenons une diminution de longueur de $0,63 \cdot 10^{-3}$ lorsque σ varie de 100 à 500 bars.

c) Echantillon RO₂F

Pour cet échantillon les mesures de déformation radiale sont au point et nous trouvons dans la figure 36 les courbes concernant les déformations radiales et axiales.

Pour chaque pression p, nous avons obtenu des réseaux de courbes parallèles, ce qui explique que la reproduction des deux courbes moyennes est suffisante.

En ce qui concerne la longueur, nous obtenons une diminution relative de $0,6 \cdot 10^{-3}$ et pour le diamètre une diminution relative de $1,15 \cdot 10^{-3}$.

Fig. 34

DEFORMATION AXIALE
D'UN ECHANTILLON LS81

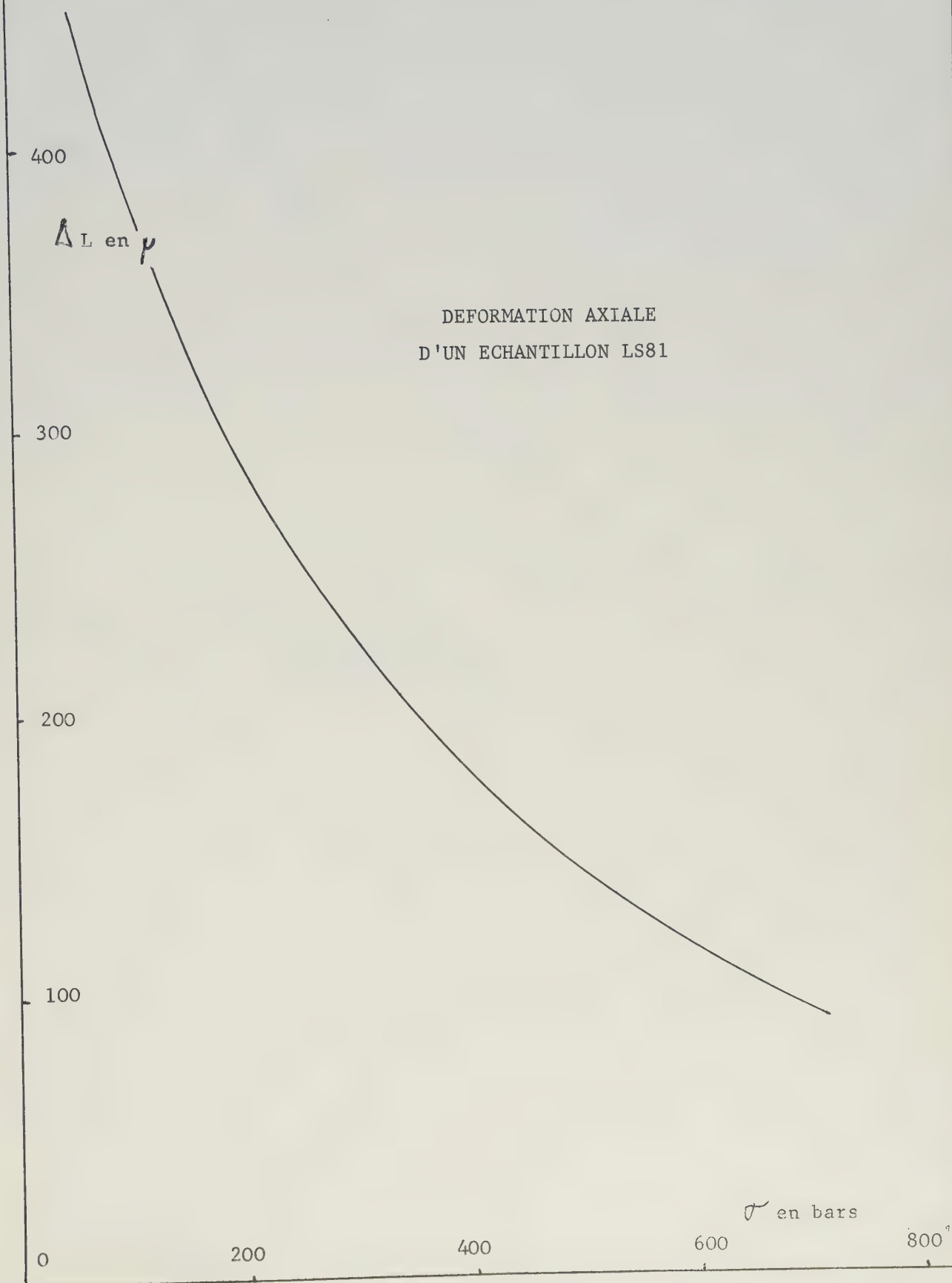


Fig. 35

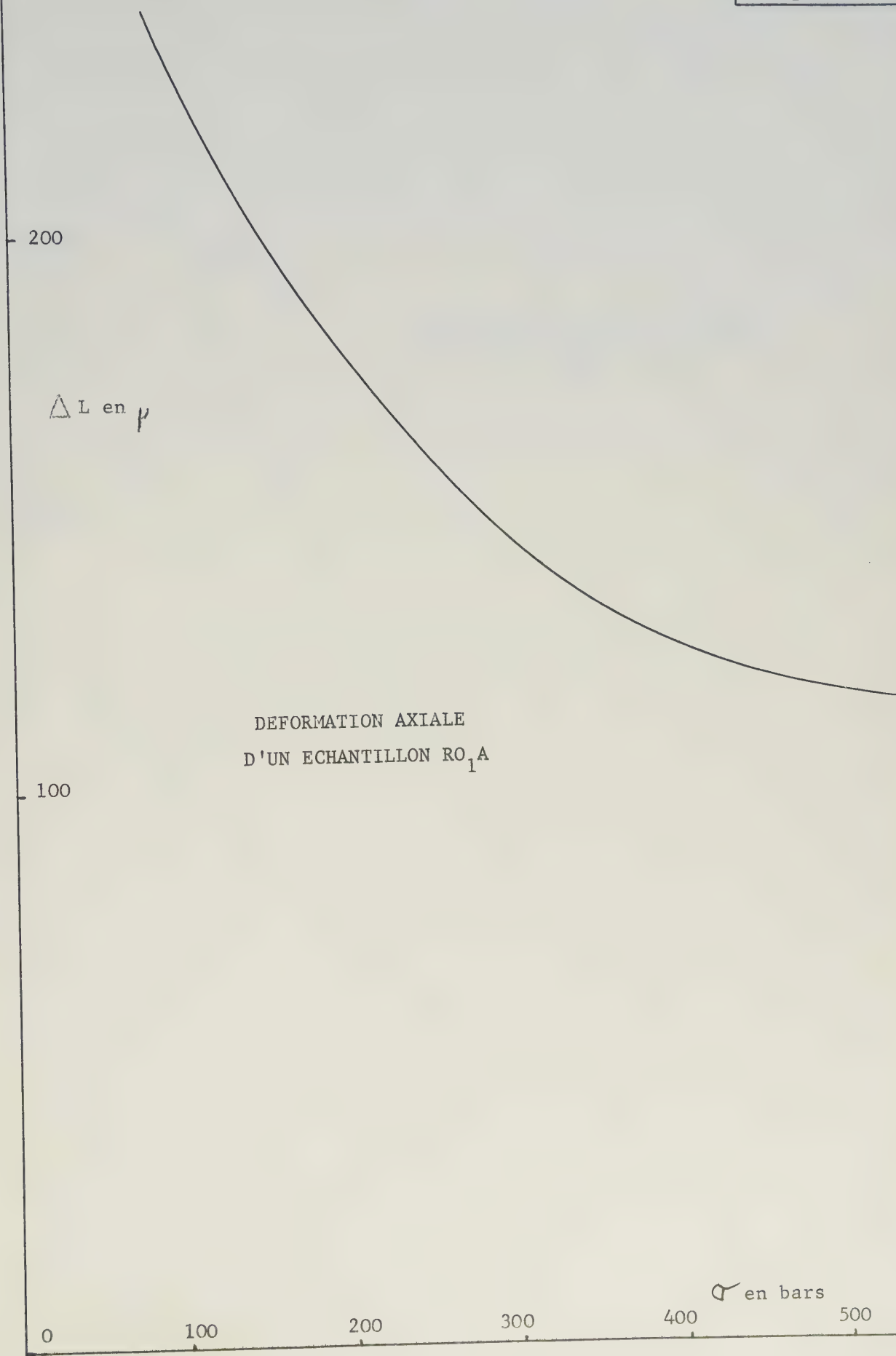
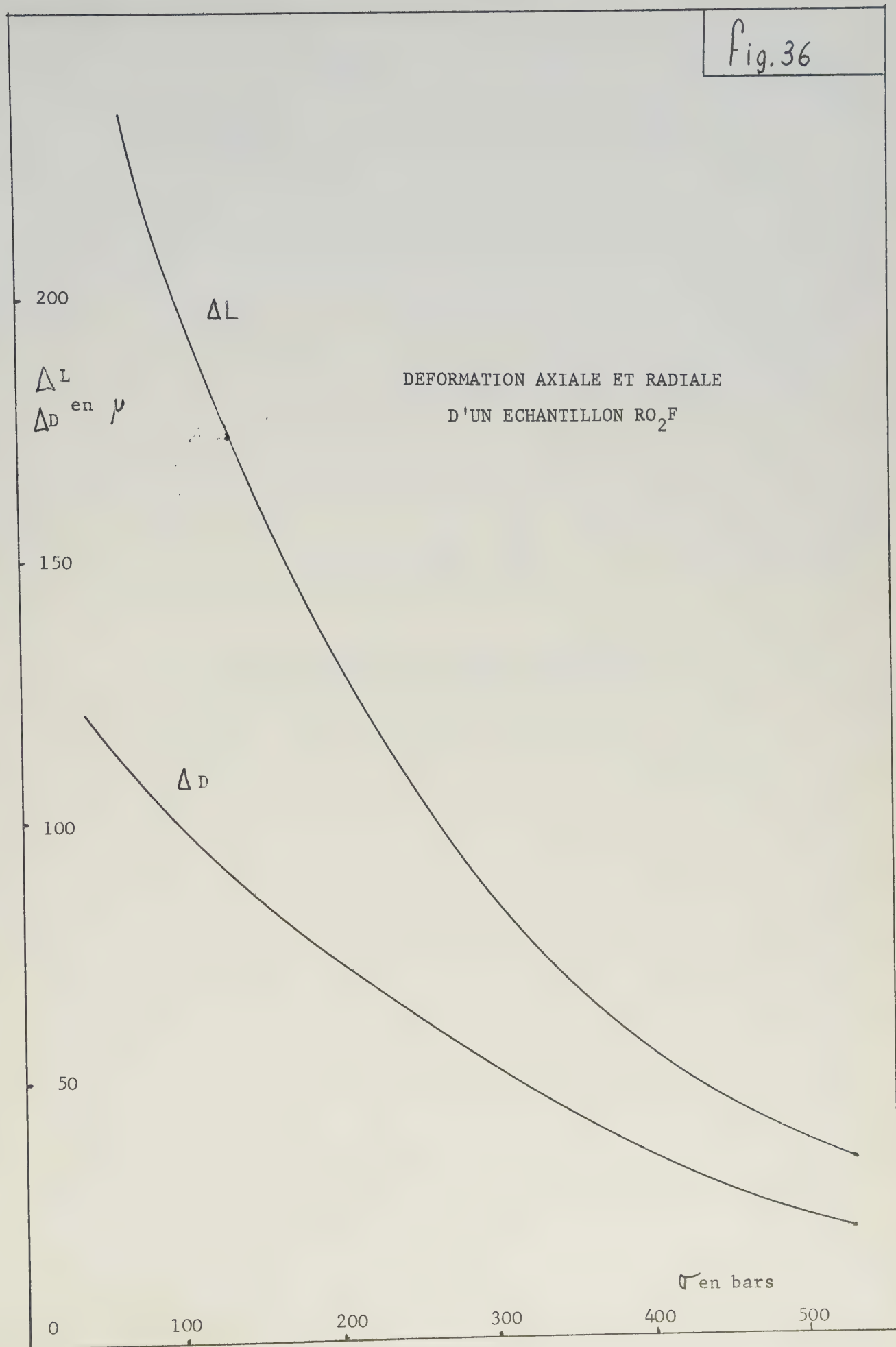


Fig. 36

DEFORMATION AXIALE ET RADIALE
D'UN ECHANTILLON RO_2F



C H A P I T R E I V

INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - PERMEABILITE

L'allure générale des courbes obtenues est sensiblement la même pour chaque échantillon.

La décroissance pour les faibles contraintes σ s'apparente assez bien avec une décroissance logarithmique. Par contre la courbe tend à s'aplatir pour les contraintes plus élevées. WYBLE signale d'ailleurs à ce sujet de ne pas aboutir à une bonne représentation de ses résultats expérimentaux, en adoptant une loi asymptote à une valeur limite du pourcentage de réduction.

Les ordres de grandeur de ces variations sont en bon accord avec les résultats tirés de la bibliographie.

L'importante réduction de la perméabilité constatée sur le grès AR16 F45b, qui atteint 70 % pour une élévation de σ de 0 à 500 bars est en bonne corrélation avec un résultat obtenu par CHIERICI et CIUCCI. Ceux-ci ont enregistré pour un grès une réduction de perméabilité de 80 % pour une élévation de la contrainte de 0 à 450 bars.

En ce qui concerne les perméabilités en fonction de la pression p , l'augmentation est assez lente pour les pressions faibles, mais devient sensiblement logarithmique quand la pression p augmente.

Pour une même valeur absolue de la contrainte, on s'aperçoit que la perméabilité en fonction de p subit une variation plus importante que la perméabilité en fonction de σ .

Ceci démontre que, bien qu'appliquées sur la même matrice solide, les contraintes dues à p ou à σ vont entraîner des comportements de la roche bien différents.

Quant à l'effet d'hystérésis, il s'est avéré inexistant, à la condition d'observer un temps de stabilisation de l'ensemble contraintes-déformations suffisamment long. Les expériences de perméabilité font entrevoir que ce temps sera bien plus long lors de la relaxation de la roche que lors de sa charge.

B - COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE

A la lumière des résultats des courbes de compression et de production des échantillons KF 2/4 4AX et LS81, nous avons pu constater que les coefficients de compressibilité étaient constants dans la gamme de contraintes considérées.

Ces deux échantillons de calcaire ont subi des déformations tout en restant dans le domaine de l'élasticité linéaire. L'effet d'hystérésis a été inexistant et les temps de stabilisation de l'ordre de la demi-heure pour les essais statiques (compression, production) et de l'ordre de l'heure pour les essais dynamiques (perméabilité).

Nous avons pu constater également que les courbes de compression et de production présentaient des écarts importants du point de vue de leur pente, et que ces différences ne pouvaient pas n'être dues qu'à l'influence du facteur de compressibilité solide.

La contrainte σ appliquée sur la surface de l'échantillon subit nécessairement une atténuation radiale et axiale. Il en résulte que l'état de contrainte d'un élément de volume au sein de la roche est différent de celui affiché.

Par contre, la pression p du fluide peut être considérée comme uniforme dans tout l'échantillon, puisque celui-ci sera choisi en général homogène et possédant une répartition de pores homogène.

On comprend donc que dans ces expériences, le terme de contrainte effective $\sigma - p$ soit impropre. La représentation des courbes de compression et de production en fonction de $\sigma - p$ implique nécessairement que l'on suppose que chaque courbe ne dépend que d'un des deux paramètres.

Cette représentation a été admise et utilisée rituellement par de nombreux auteurs, qui peuvent ensuite comparer les deux courbes à partir d'un même élément différentiel $d(\sigma - p)$.

Malheureusement, on ne retrouve la trace que de rares expérimentations tendant à démontrer que chaque courbe ne dépend que d'un paramètre, σ ou p .

On comprend donc l'intérêt de mesurer séparément les variations de volume en fonction de σ d'une part, de p d'autre part.

C'est ce que nous avons réalisé pour les échantillons RO_1A et RO_2F et que les figures 21 et 22 mettent en évidence.

Les courbes obtenues ne sont pas linéaires. Par contre si l'on reporte les graphes de compression en coordonnées semi-logarithmiques (fig. 37 et 38), ils deviennent des droites.

De plus nous pouvons considérer que ces courbes sont parallèles ; donc les coefficients de compressibilité correspondants ne seront pas des fonctions de la pression p .

Fig. 37

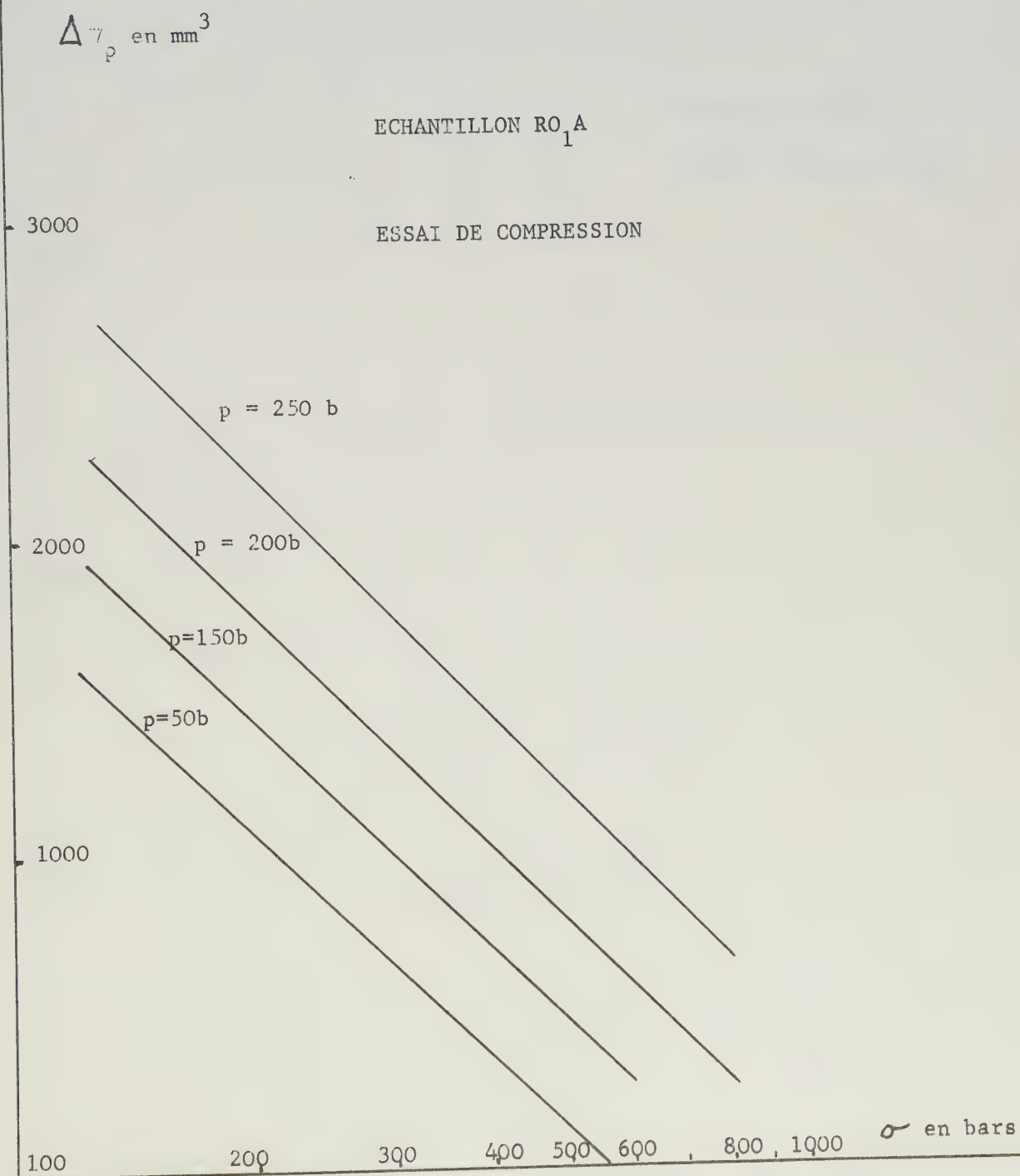
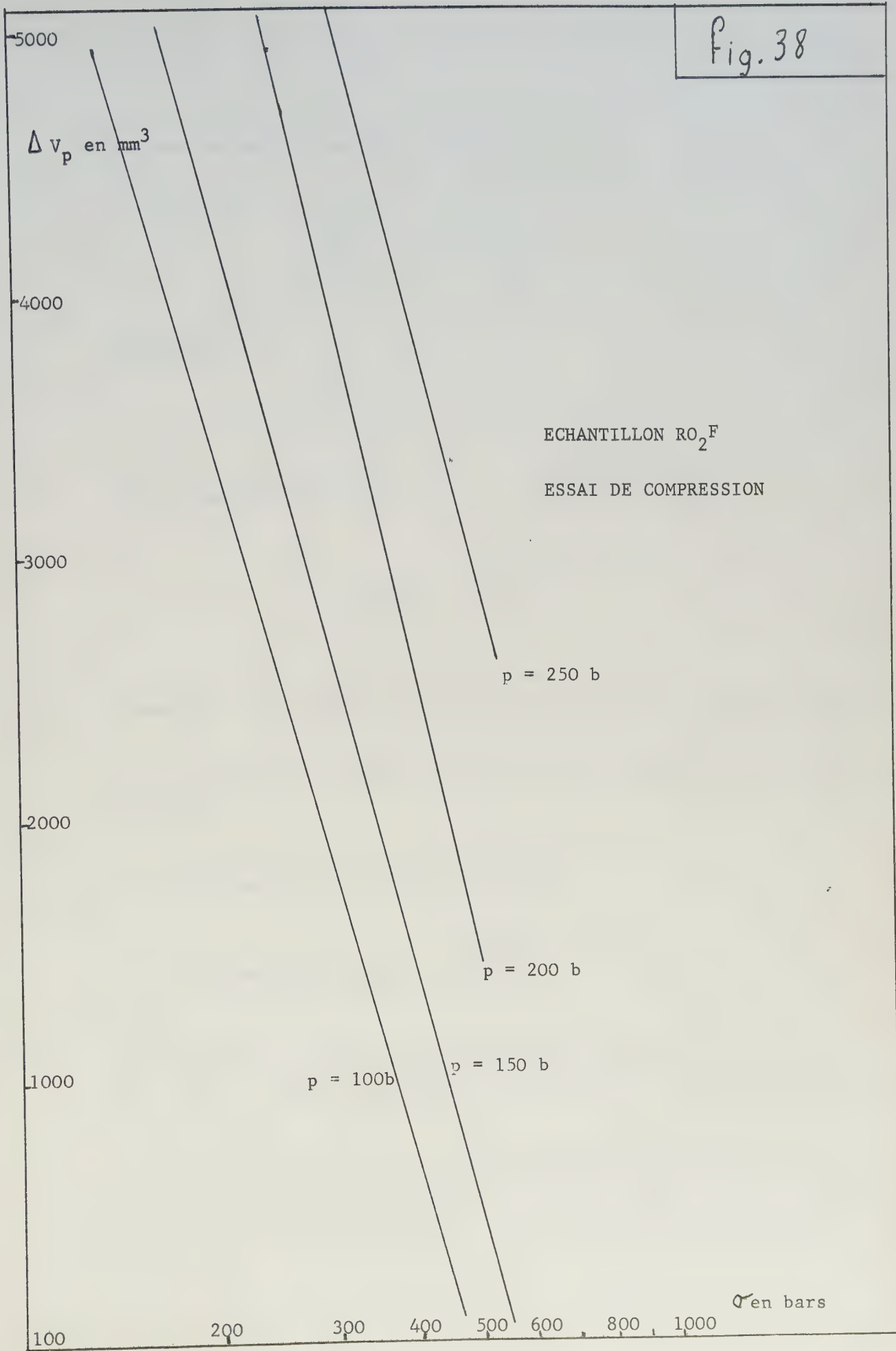


Fig. 38



Les pentes seront donc de la forme :

$$\frac{d \Delta v_p}{d \log \sigma} = \text{constante} = \alpha$$

ou encore :

$$d \Delta v_p = \beta \cdot d \ln \sigma$$

Si l'on dérive par rapport à σ :

$$\frac{dv_p}{d \sigma} = \frac{\beta}{\sigma}$$

Comme $C_p = \frac{1}{v_{p0}} \cdot \frac{dv_p}{d \sigma}$ on en déduit que le coefficient de compressibilité de pores en essai de compression est une fonction hyperbolique de σ .

$$\text{On trouve pour RO}_1\text{A : } C_p = \frac{-2,18 \cdot 10^{-2}}{\sigma}$$

$$\text{et pour RO}_2\text{F : } C_p = \frac{-4,6 \cdot 10^{-2}}{\sigma}$$

Nous constatons que ces deux échantillons, bien que semblables, ont des compressibilités différentes, l'une étant le double de l'autre.

Il est bien évident que seule une partie de l'hyperbole est à prendre en considération et que pour les faibles contraintes, le coefficient de compressibilité C_p n'est pas infini mais possède une certaine

valeur limite. L'expression générale de C_p ne sera donc à prendre en compte qu'à partir de 100 ou 200 bars.

En ce qui concerne les essais de production, la représentation n'est pas logarithmique comme nous l'avons vu pour les essais de compression.

Si l'on relève graphiquement les pentes des courbes de production, on s'aperçoit qu'en coordonnées semi-logarithmiques, elles varient linéairement avec p , pression de pores (fig. 39, 40).

Nous pouvons supposer que ces courbes sont parallèles et équidistantes en faisant une approximation. Ceci nous amène à déduire que C'_p dépend de σ .

Cherchons l'expression de ces droites $\frac{d \Delta v_p}{dp} = f(p)$

On aboutit à une expression de la forme :

$$p = \lambda_1 \log \frac{d \Delta v_p}{dp} + \lambda_2 \sigma + \lambda_3$$

ou encore $p = \lambda_1 \log v_p \cdot C'_p + \lambda_2 \sigma + \lambda_3$

en tirant C'_p de cette expression on a :

$$C'_p = \lambda \frac{e^{\lambda p}}{e^{\beta \sigma}}$$

On trouve pour RO_1A : $C'_p = 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{e^{1,25 \cdot 10^{-2} p}}{e^{1,13 \cdot 10^{-2} \sigma}}$

Fig. 39

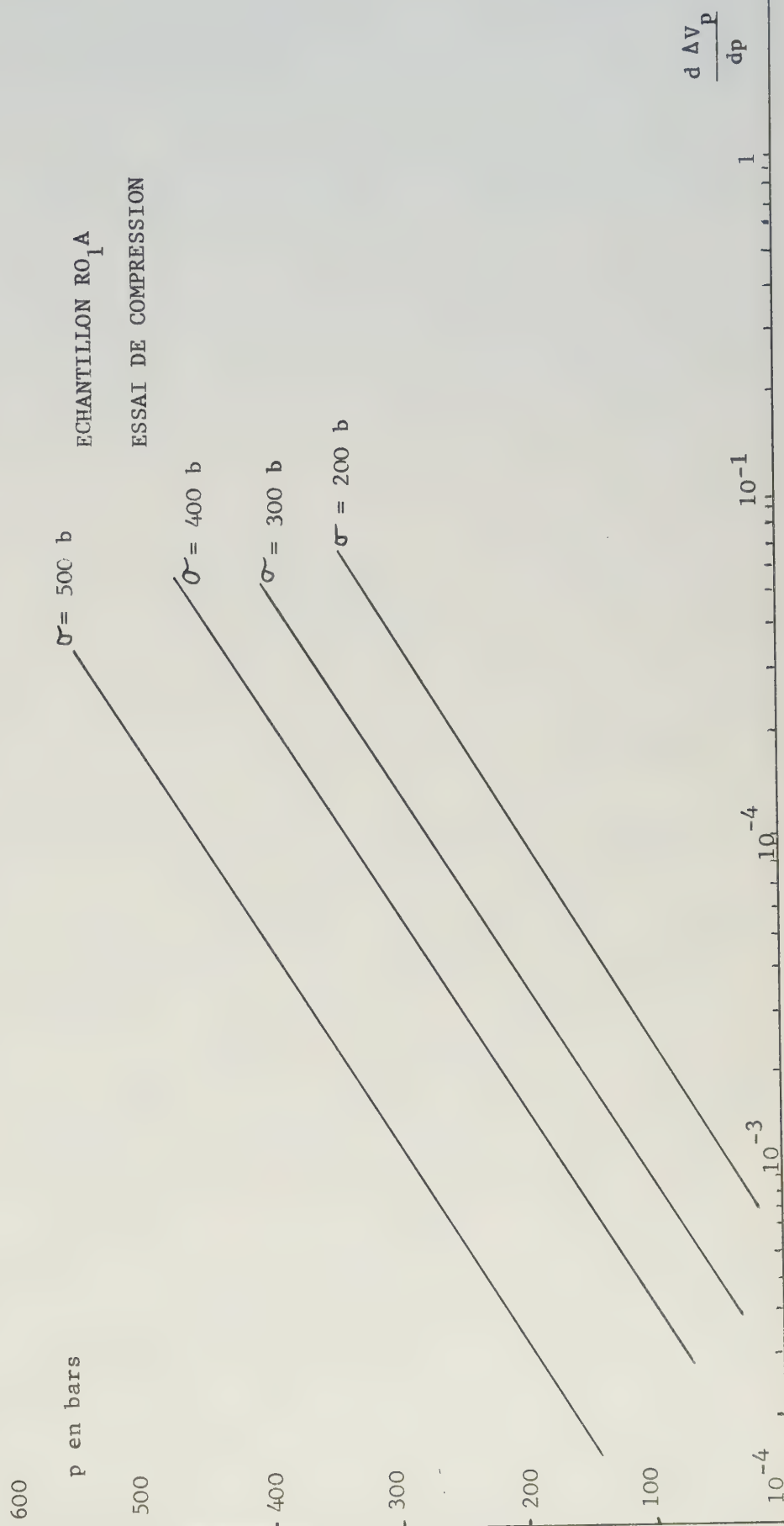
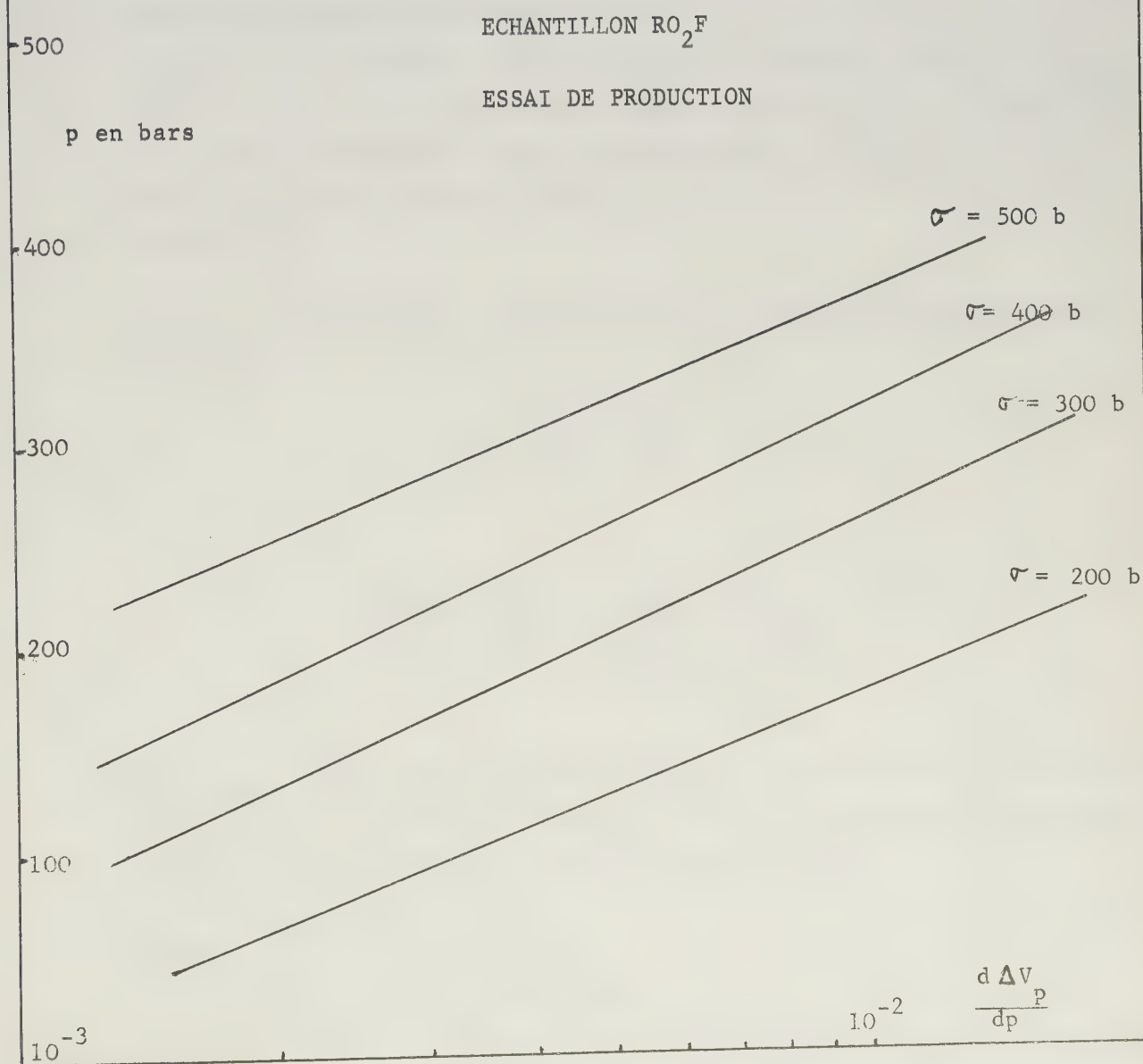


Fig. 40



$$\text{et pour RO}_2^F : C'_p = 0,2 \frac{e^{2,2 \cdot 10^{-3} p}}{e^{1,6 \cdot 10^{-3} \sigma}}$$

Les courbes des figures 41 et 42 permettent de conclure en comparant les coefficients de compressibilité C'_p et C_p .

Les deux échantillons RO₁A et RO₂F, issus du même gisement mais de forages différents, montrent une très grande similitude de comportement. Si leur compressibilité est différente, les lois qui régissent ces variations sont les mêmes.

Précision des mesures : calcul d'erreur

La précision du manomètre utilisé étant de l'ordre de 1 bar, et la précision de lecture de la pompe volumétrique de 1 mm³, les courbes peuvent donc, théoriquement, être déterminées avec une excellente précision, c'est-à-dire avec une erreur < 2 % en abscisse et de 0,5 % en ordonnée.

Pour une compressibilité calculée sur une plage de pression de 50 bars, on obtient :

$$C_p = \frac{1}{V_{p_0}} \cdot \frac{\Delta V_p}{\Delta \sigma}$$

d'où :

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} = \frac{\Delta V_{p_0}}{V_{p_0}} + \frac{\Delta \Delta V_p}{\Delta V_p} + \frac{\Delta \Delta \sigma}{\Delta \sigma}$$

Le premier terme, précision des mesures de routine, est en général inférieur à 1 %, le dernier est égal à 2/50 et le terme du milieu, dans le cas le plus défavorable, est de l'ordre de 1/50.

D'où :

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} \ll 7 \%$$

Fig. 41

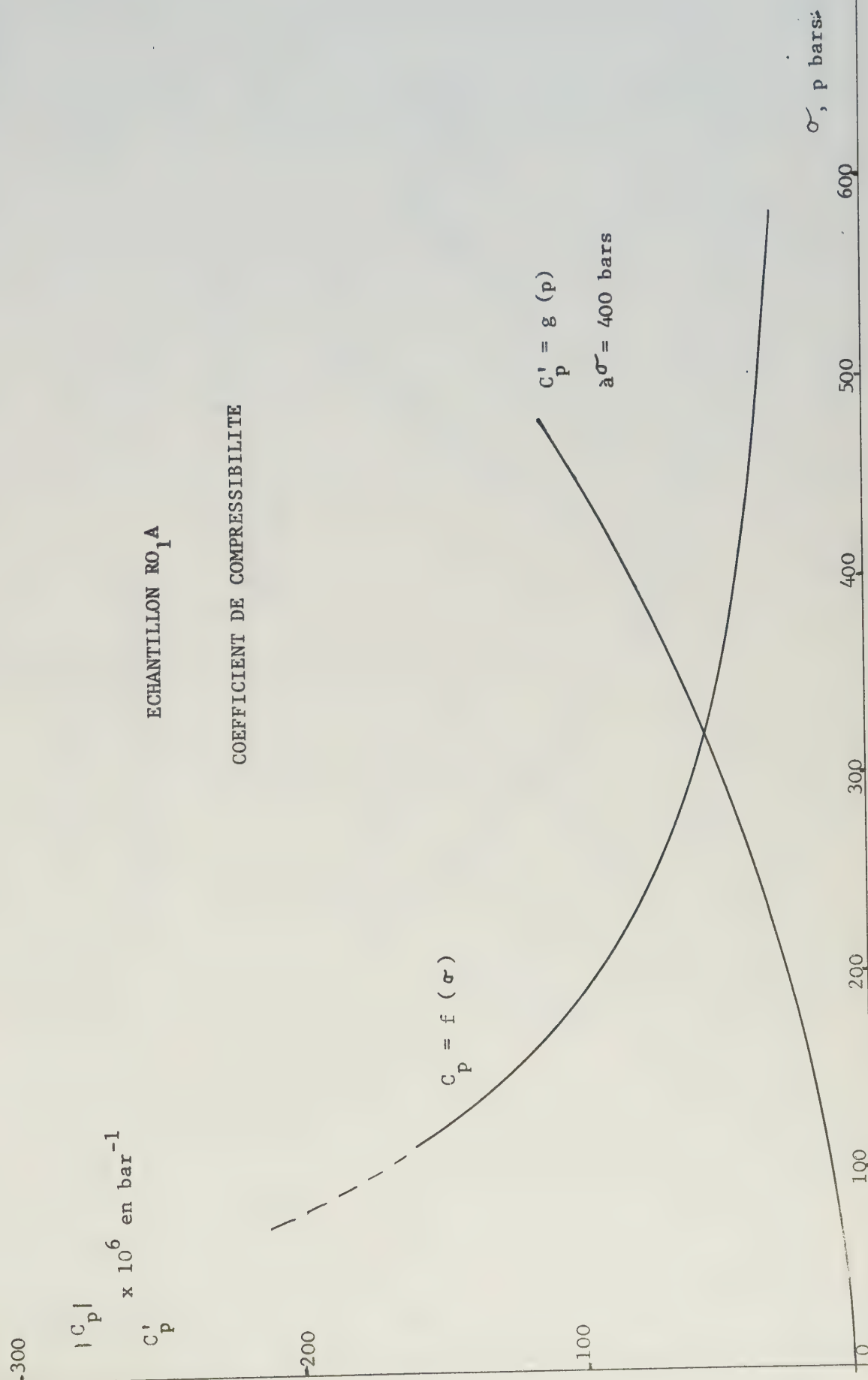


Fig. 42

ECHANTILLON RO_2F

COEFFICIENT DE COMPRESSIBILITE

$|C'_p|$
 $\times 10^6 \text{ en bar}^{-1}$

$C'_p = g(p)$

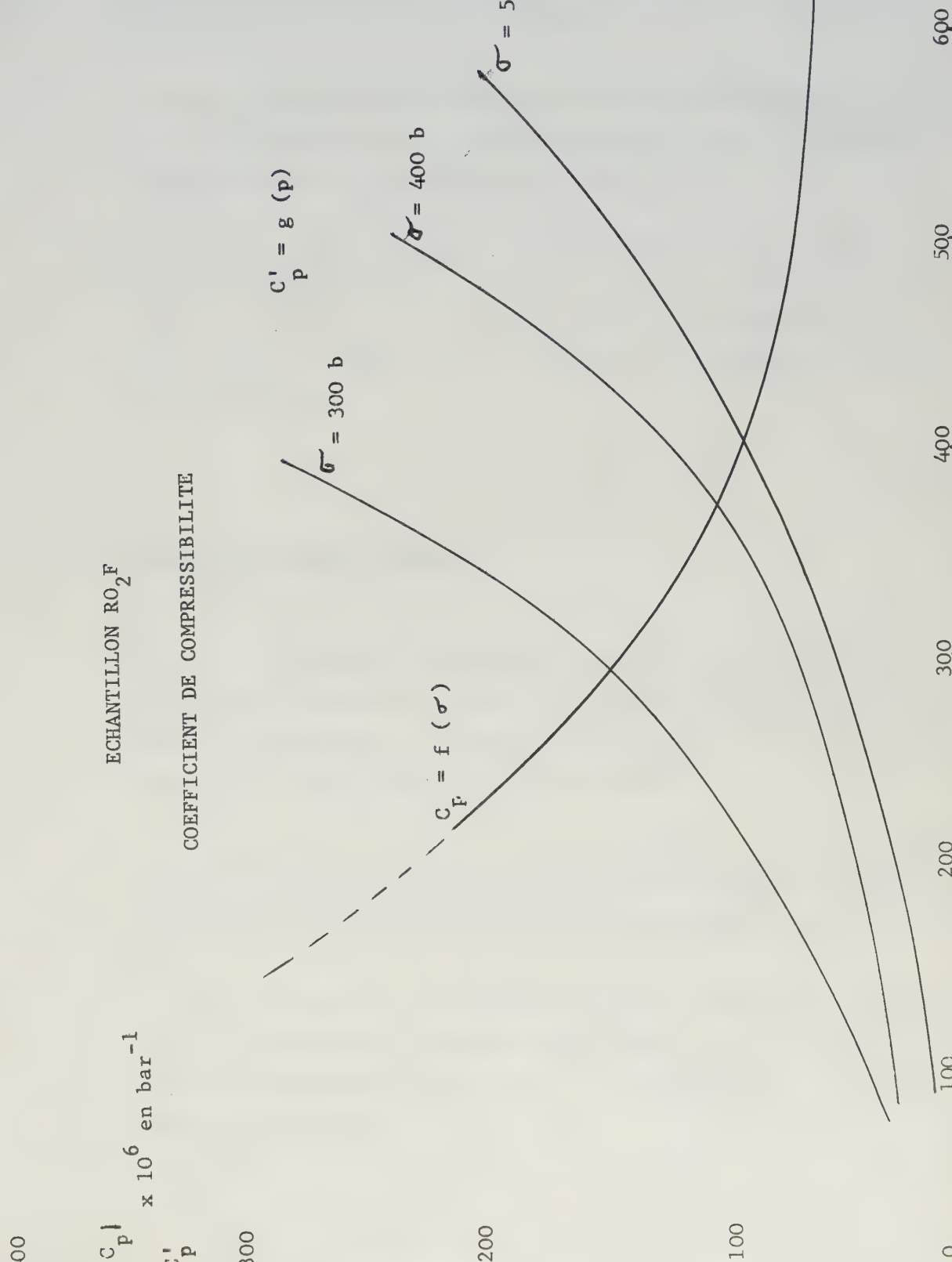
$C_F = f(\sigma)$

$\sigma = 300 \text{ b}$

$\sigma = 400 \text{ b}$

$\sigma = 500 \text{ b}$

$\sigma, p \text{ en bars}$



On voit que la précision sur C_p (ou C'_p) dépend en grande partie de celle de ΔV_p . Cette précision sera d'autant moins bonne que la porosité de l'échantillon sera faible.

Les quatre échantillons étudiés ont toutefois des porosités moyennes ce qui signifie que la détermination de C_p et C'_p s'accompagne d'une précision qui ne devrait pas excéder 7 %.

Le calcul précédent ne prend en considération que les causes d'erreurs mesurables. Ce ne sont pas les seules à intervenir. On ne peut pas faire entrer dans les calculs les erreurs dues aux fluctuations de température par exemple, ou l'influence de la saturation initiale.

C - CORRELATIONS AVEC LA THEORIE

On peut, en première approximation, considérer les échantillons étudiés comme visco-élastiques. Le caractère reproductible des diverses courbes montre en effet que s'il existe un phénomène d'hystérésis il ne peut être que faiblement marqué.

Les valeurs obtenues ainsi que leurs variations sont en bon accord avec les résultats d'autres auteurs et les échantillons étudiés se situeraient dans une gamme de milieux moyennement consolidés.

Les résultats sont en très bonne concordance avec ceux obtenus par HALL en étudiant des calcaires et des grès. Celui-ci trouve également que les valeurs de C'_p peuvent être supérieures à C_p pour certaines contraintes.

Les coefficients de compressibilité C_T , C_p et C_s sont liés par la relation :

$$C_T = (1 - \varphi) C_s + \varphi \cdot C_p \text{ où } \varphi \text{ est la porosité.}$$

Mesurant C_p et C_s avec une bonne précision, nous pouvons déduire C_T , et tenter de valider les mesures de déformation de la roche. Malheureusement nous n'avons pu enregistrer complètement ces derniers que pour l'échantillon RO_2F .

On peut toutefois constater sur la figure 43 que la courbe expérimentale tirée de la figure 36 est très voisine de la courbe "théorique".

Compte tenu que nous avons obtenu des résultats voisins en ce qui concerne les déformations axiales des autres échantillons, nous sommes en droit de donner un bon crédit aux mesures effectuées.

La bonne corrélation des deux courbes de la figure 43 permet également de conclure que, lors d'une compression triaxiale, la déformation de la roche est sensiblement cylindrique.

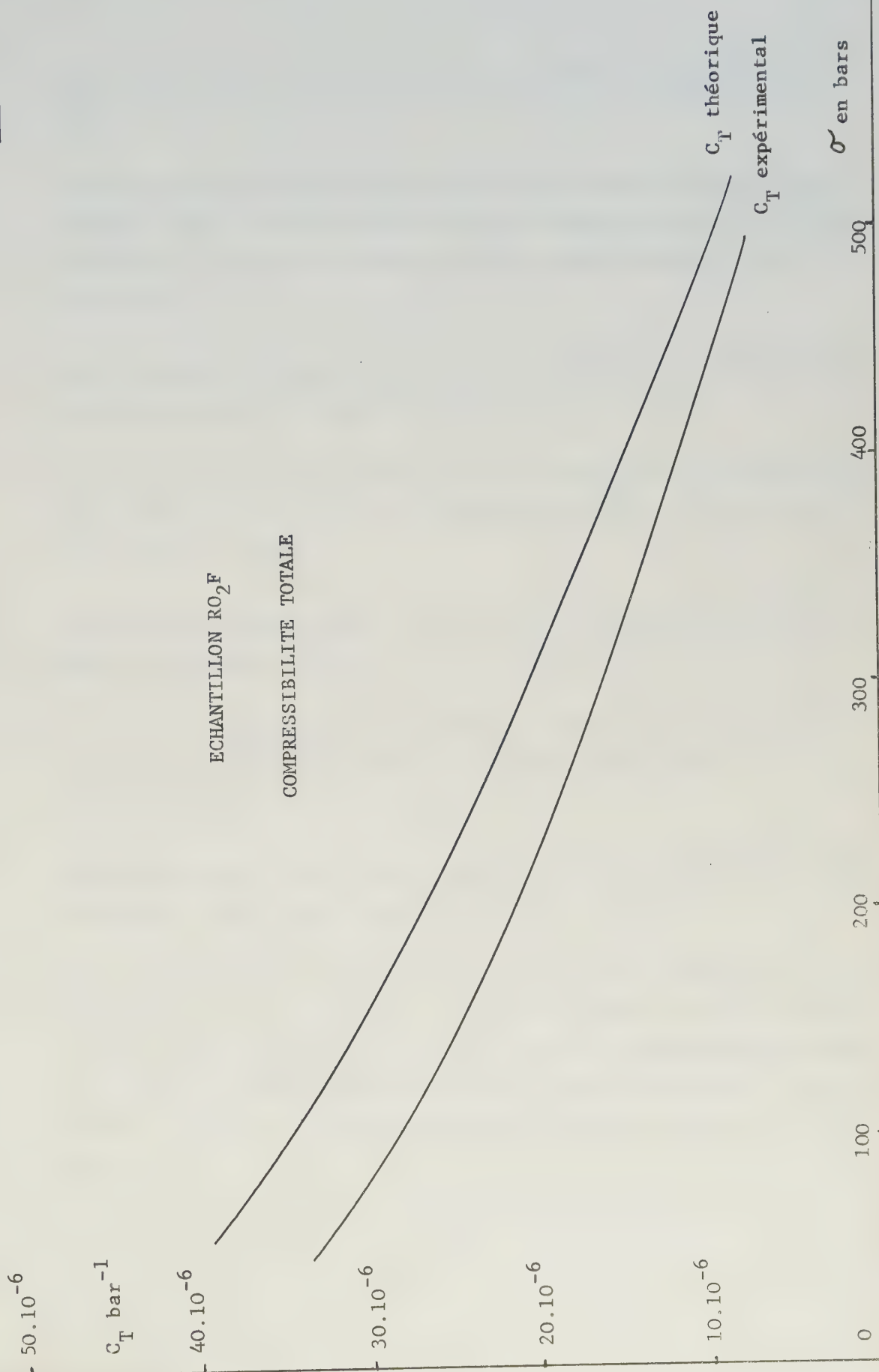
Comparons maintenant les résultats obtenus avec ceux calculés par la théorie de la mécanique des roches.

Le coefficient de compressibilité totale (ou apparente) C_T est fonction du module d'YOUNG E et du coefficient de POISSON $\mathcal{J}$. Il s'exprime par :

$$C_T = \frac{3}{E} (1 - 2\mathcal{J})$$

Des expériences ont été réalisées afin de déterminer les valeurs de E et $\mathcal{J}$; les échantillons ont été soumis à une compression simple au

Fig. 43



moyen d'une presse. Les contraintes appliquées n'ont pas excédé 50 bars.

Les deux calcaires KF 2/4 4AX et LS81 ont un module d'YOUNG respectivement égal à 3000 bars et 20 000 bars. Quand aux calcaires dolomitiques RO₁A et RO₂F, ils présentent tous deux un module E égal à 35 000 bars.

Les allongements axiaux et radiaux ont été mesurés et nous avons pu calculer C_T tiré de l'expression précédente.

Pour l'échantillon KF 2/4 4AX, les mesures de C_p et C_s ont donné pour C_T la valeur $44.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$. En compression simple, nous avons calculé $C_T = 70.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$.

Pour LS81, nous avons obtenu $C_T = 15,6.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$ alors que les essais à la presse ont permis de calculer $C_T = 55.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$.

Pour RO₁A, nos expériences ont donné $C_T = 18.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$ alors que les essais de compression simple ont fourni comme résultat $C_T = 79.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$.

De même pour RO₂F, nous avons trouvé $C_T = 25.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$ alors qu'en compression simple, $C_T = 60.10^{-6} \text{ bar}^{-1}$.

Les résultats obtenus par les essais de compression simple sont plus élevés que ceux que nous avons calculés à partir des coefficients C_p et C_s . Cela s'explique par le fait que les contraintes appliquées par la presse ne dépassaient pas 50 bars et que nous avons vu qu'aux faibles contraintes, le coefficient de compressibilité était le plus élevé.

De plus les mesures du coefficient de POISSON n'ont pas été accompagnées d'une grande précision.

Néanmoins, les corrélations obtenues ne sont pas erronées et mènent à penser que les résultats que nous avons relevés au cours de ce travail sont en bon accord avec les lois de la mécanique des roches.

Nous avons parlé dans le chapitre I de l'intérêt d'établir dans les phénomènes de compressibilité de la roche, l'analogie entre déformations élastiques et vitesses de déformations visqueuses.

Il nous a semblé qu'un paramètre devait être prépondérant dans les termes de visco-élasticité : la cohésion.

Nous avons donc mesuré ce coefficient grâce à un essai de compression simple jusqu'à la rupture de l'échantillon. La cohésion est reliée à la résistance à la compression simple σ_R . On peut l'exprimer par :

$$\text{Cohésion} = \frac{\sigma_3}{2}$$

Les résultats ont été les suivants :

Echantillons : KF 2/4 4AX	Cohésion = 85 bars
LS81	Cohésion = 155 bars
RO ₁ A	Cohésion = 310 bars
RO ₂ F	Cohésion = 330 bars

Il s'avère que les cohésions sont pratiquement dans le même rapport que les temps de stabilisation, et par conséquent dans le même rapport des coefficients de viscosité volumique ζ .

Il semblerait également que cette cohésion intervienne dans le rapport des coefficients C_p et C'_p . Cependant les expériences n'ont pas été suffisamment nombreuses pour conclure à ce sujet. Nous nous contentons d'ouvrir une porte à l'intervention de la cohésion dans les phénomènes de déformations des roches.

C O N C L U S I O N

Le présent travail nous a fourni un certain nombre de résultats concernant l'étude de la porosité, de la perméabilité, des conductivités électriques et des déformations des roches dans les conditions de contrainte du gisement.

Une étude bibliographique préliminaire a permis de mettre en évidence que le fait de ne pas tenir compte de la compressibilité de la roche conduit à trouver des valeurs trop élevées pour les réserves et ce qui est plus grave pour la récupération totale calculée à partir de ces réserves.

Des considérations théoriques nous ont amenés à prévoir certains paramètres complémentaires et à les adjoindre à des théories déjà existantes. Doubles d'essais expérimentaux, ces considérations ont permis de conclure à l'insuffisance des principales théories jusqu'à ce jour, qui étaient basées sur des hypothèses trop restrictives.

L'installation mise au point permet la détermination des porosités, des perméabilités et simultanément des conductivités électriques, des vitesses d'ondes ultra-sonores et des déformations d'échantillons cylindriques soumis à des pressions uniformes pouvant dépasser éventuellement 1000 bars.

La variation de ces paramètres peut être déterminée pour des conditions de pression interne variées.

Les résultats expérimentaux obtenus sur la variation du volume des pores confirment correctement l'hypothèse admise pour l'étude théorique des milieux poreux : l'élasticité non linéaire.

Les expériences réalisées ont été scindées en deux parties concernant d'une part les essais de compression et d'autre part les essais de production. Elles ont permis de comprendre l'intérêt d'étudier séparément les effets de la contrainte de confinement σ et de la pression de pores p . Elles ont fait entrevoir le danger d'utiliser abusivement le terme de contrainte effective $\sigma - p$. Enfin elles ont permis d'aboutir à des lois empiriques de variations du volume des pores de la roche ; il est apparu une excellente similitude pour des échantillons originaires du même gisement mais de puits différents.

L'allure générale des courbes indique que la compressibilité en compression diminue assez brutalement lorsque la contrainte σ varie de 0 à 200 bars, et que la compressibilité en production diminue également brutalement lorsque chute la pression de pores de la pression de gisement p_g à $p_g - 100$ bars. Ce terme sera donc, en général, très sensible aux conditions initiales choisies pour représenter le gisement.

L'étude des perméabilités a été opérée en considérant l'influence de la contrainte de confinement σ et de la pression de pores. La possibilité de créer un écoulement à travers la roche tout en conservant une pression moyenne à l'intérieur, fait de cette expérience une originalité. Nous avons pu y voir que la chute de pression d'un gisement provoquait une diminution très marquée de la perméabilité et que ces résultats pouvaient avoir des répercussions très importantes dans un calcul de récupération ou de temps de récupération.

Ce travail présente en outre d'autres intérêts. Nous pensons avoir contribué à préciser la validité des mesures de routine et l'importance du facteur compressibilité dans un calcul de balance de matériel.

L'installation mise au point a permis l'extension des recherches à d'autres points particuliers.

Nous avons montré que la température est un facteur intervenant pour modifier la compressibilité.

Les résultats ont montré que l'état de consolidation du milieu est un paramètre d'importance majeure. La détermination des cohésions des échantillons a permis de montrer que les phénomènes visco-élastiques entraînant des stabilisations plus ou moins lentes, ont une grande importance dans la durée des essais.

Enfin nous n'avons fait qu'aborder l'étude de la représentation des expériences de laboratoire à l'échelle du gisement. Nous avons défini trois types de comportement possibles d'un réservoir naturel et nous y avons introduit des coefficients mesurables en laboratoire. Cette question mérite un intérêt particulier d'autant plus qu'elle pourra aboutir à la connaissance du comportement des contraintes de confinement en fonction de la pression p .

Pour conclure, nous souhaitons voir un jour s'effectuer des mesures en fonction des coefficients de visco-élasticité et de consolidation des milieux poreux naturels.

A N N E X E

Mesures de l'effort résistant des joints toriques sur une tige de déplacement

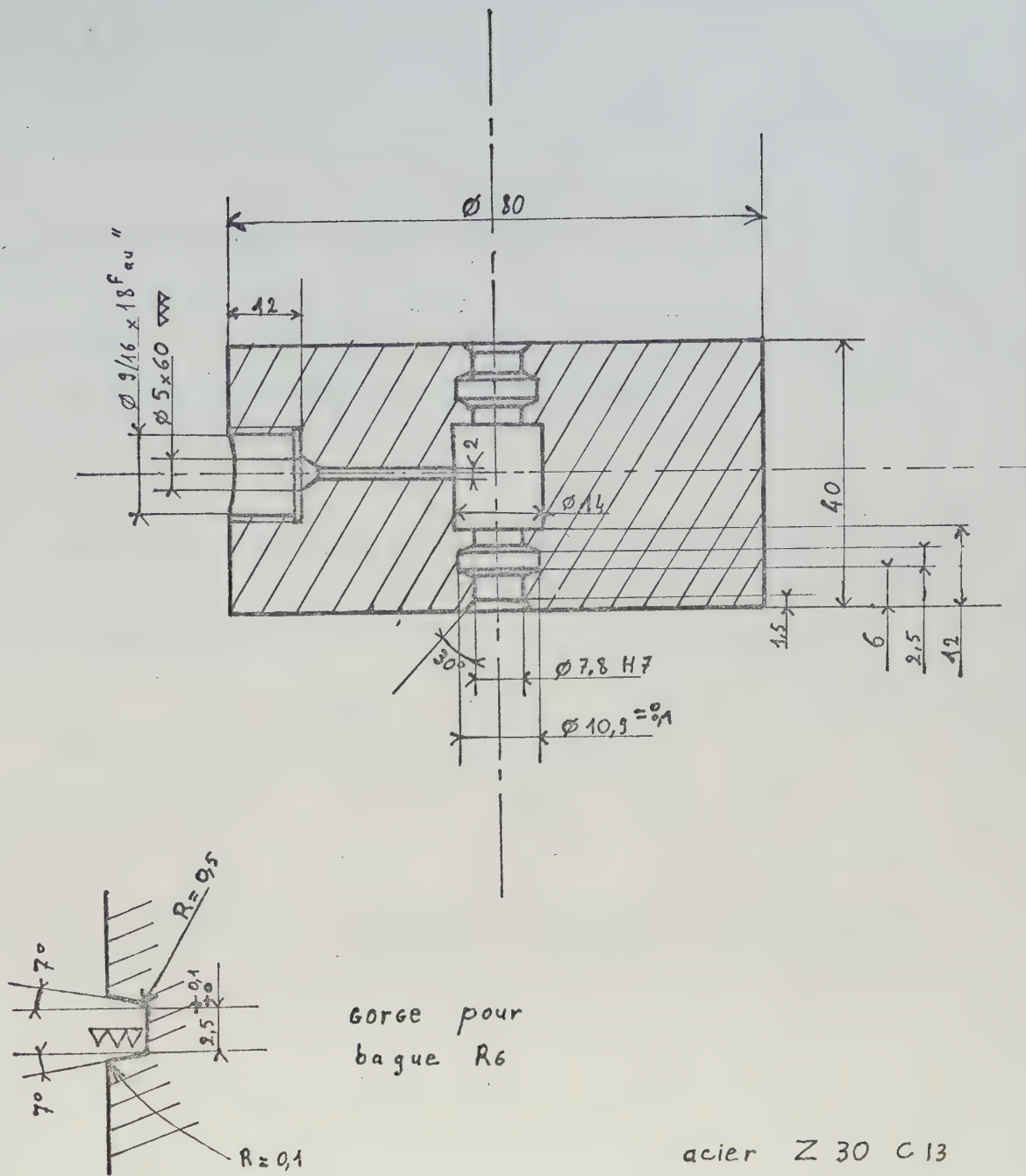
Quelques incertitudes ont fait planer le doute sur la validité des mesures de déformations radiales obtenues à l'aide des comparateurs. Ces derniers ont été testés en températures ; leurs indications ne sont pas à mettre en doute.

Par contre l'incertitude porte sur le moyen de transmettre les déformations de la roche de l'intérieur de la cellule à l'extérieur, c'est-à-dire sur les tiges de déplacement. Nous avons mis en cause un éventuel allongement des tiges soumises à la compression ; cet effet s'est avéré négligeable.

Par contre les joints toriques d'étanchéité assurent un serrage à la pression sur la tige, ce qui se traduit par des forces de frottement dont nous ne pouvons juger à priori l'importance.

C'est pourquoi nous avons mis au point une cellule qui permet de mesurer ces forces : dans un alésage en communication avec une pompe à pression, nous glissons une des tiges de déplacement qui est serrée par deux joints toriques, les mêmes que ceux qui équipent la cellule porte-échantillon. Nous rendons solidaire de la tige un plateau sur lequel nous pourrions poser des masses.

Pour chaque pression (0, 100, 200, 300 bars), nous ajoutons des masses sur le plateau jusqu'à ce que la tige se déplace. Nous mesurons ainsi la force de frottement qui, créée par les joints toriques, s'oppose au déplacement de la tige.



REP.	NBRE	DESIGNATION	MATIERE OU OBSERVATIONS
		CELLULE POUR MESURE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT DE JOINTS TORIQUES	Dessiné par <u>DELOS</u> le <u>1/3/72</u> Vérifié par _____ le _____ Approuvé par _____ le _____
		ECH. 1	S. N. P. A.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

P_{bars}	0	100	200	300
$M \text{ kg}$	4,8	8,9	10,3	11,6

Ces forces s'appliquant au moyen d'une surface de contact de $4,15 \text{ cm}^2$ sur la roche, nous en déduisons les contraintes réactives correspondantes :

P_{bars}	0	100	200	300
kg/cm^2	20	37	43	48

On voit donc que le dispositif de transmission des déformations radiales crée des contraintes de réaction qui vont s'opposer à la déformation.

T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE I : THEORIE DE LA DEFORMATION DES MILIEUX POREUX ET DE QUELQUES PROPRIETES.</u>	
A - GENERALITES - RAPPEL DES CONCEPTS DE RHEOLOGIE	10
1) La mécanique physique et son insuffisance	
2) Concepts de la Rhéologie - Coexistence de la rigidité et de la viscosité	11
B - ELASTICITE D'UN MILIEU POREUX NATUREL	13
1) Théorie de BIOT	14
2) Comportement non linéaire du milieu poreux élastique et isotrope	20
C - DEFINITION DES COMPRESSIBILITES	26
D - CORRELATIONS ENTRE LES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE EN CONDITIONS DE GISEMENT ET EN CONDITIONS DE LABORATOIRE	28
1) Détermination du coefficient global de compressibilité & d'un gisement en fonction des compressibilités et des saturations respectives de l'huile et de l'eau	28

2) Compressibilités des milieux élastiques poreux	31
3) Comportements possibles d'un réservoir et conditions limites	37
4) Contribution à l'étude de la théorie précédemment exposée	44
 E - DETERMINATION DE LA REPARTITION DES CONTRAINTES DANS UN GISEMENT	 48
 F - MOBILITE STATIQUE ET DYNAMIQUE DU LIQUIDE SATURANT LES PORES D'UNE ROCHE	 50
1) Vibration d'un fluide visqueux	50
2) Généralités	51
 G - REMARQUES SUR LA THEORIE DES ECOULEMENTS DE FILTRATION	 52
1) Limites de validité de la loi de DARCY	52
2) Tentative de justification de la forme tensorielle de la loi de DARCY	53

CHAPITRE II : INSTALLATIONS ET EXPERIMENTATIONS REALISEES.

A - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION - RECONSTITUTION DES CONDITIONS DE GISEMENT	57
1) Cellule porte-échantillon	57
2) Dispositif d'expérimentations	60

B - EXPERIMENTATIONS REALISEES	64
1) Saturation de l'échantillon	64
2) Mesures des perméabilités en fonction de σ et p	65
3) Mesures des coefficients de compressibilité de pores en fonction de σ et p	67
4) Mesures du coefficient de compressibilité solide	72
5) Mesures de conductivité électrique	73
6) Mesures de la déformation des roches	73
7) Mesures de la vitesse d'ondes ultra-sonores	75
8) Corrections de compressibilité de l'eau, étalonnages	77

CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - CONDITIONNEMENT GENERAL DES ESSAIS	83
B - ECHANTILLONS ETUDIES	84
C - MESURES DES PERMEABILITES	85
1) Variations de la perméabilité en fonction de la contrainte σ	85
2) Variations de la perméabilité en fonction de la pression p.	88

D - MESURES DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE DE PORES	90
1) Essais de compression	90
2) Essais de production	93
E - MESURES DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE SOLIDE	94
F - MESURES DES CONDUCTIVITES ELECTRIQUES	96
G - MESURES DE LA DEFORMATION	97

CHAPITRE IV : INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - PERMEABILITE	100
B - COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE	101
C - CORRELATIONS AVEC LA THEORIE	106

<u>CONCLUSION</u>	110
-------------------	-----

<u>ANNEXE</u>	113
---------------	-----

B I B L I O G R A P H I E

(1) - P. MORLIER

"Etude expérimentale de la déformation des roches".

- Revue de l'I.F.P. - Octobre 1964 (1113 - 1147) - novembre 1964 (1183 - 1217).

(2) - J. BONFILS

"La compressibilité de la roche dans le mécanisme de la récupération à HASSI-MESSAOUD".

- A.R.T.F.P. 10 - 14 Juin 1963 (145 - 161).

(3) - M. KUSAKOV et N. GUDOK

"Influence des pressions extérieures sur les propriétés de filtration des roches extérieures"

- Neftjanoe Khozjaj s-t-v-o - Juin 1958.

(4) - B.V. BAIDYUK

"Mechanical properties of rocks at high temperatures and pressures"

- Institute of Geology and Development of Mineral Resources - Moscow - U.S.S.R. 1967.

(5) - P. LE TIRANT, M. de BRUYNE, Y. CASTEL

"Perméabilité des roches sous contrainte"

- A.R.T.F.P. Réf. 16014 - Juin 1968

(6) - A.S. Mc LATCHIE, R.A. HENSTOCK, J.W. YOUNG

"The effective compressibility of reservoir rock and its effects on permeability"

- Meeting of S.P.E. - Octobre 1957 - Petr. Trans. AIME Vol. 213 (386 - 388).

(7) - D.O. WYBLE

"Effect of applied pressure on the conductivity, porosity and permeability of sandstones"

- Journal of Petroleum Technology - November 1958 (57 - 59).

(8) - CHIERICI, CIUCCI, EVA, LONG

"The effect of overburden pressure on some petrophysical characteristics of sandstone reservoir rocks"

- 7ème congrès mondial du pétrole de MEXICO - 1967.

(9) - I. FATT

"The effect of overburden pressure on relative permeability"

- Petr. Trans., AIME - Vol. 198 (325 - 326) - 1953.

(10) - J.W. WILSON

"Détermination of relative permeability under simulated reservoir conditions"

- A.I.Ch.E. Journal - March 1956 (94 - 100)

(11) - Y. CASTEL et G. BARON

"Mesures des coefficients de compressibilité et des caractéristiques mécaniques d'une série de roches fournies par la Deutsche Erdöl Aktiengesellschaft (HAMBURG)"

- Revue I.F.P. - Réf. 10346 - Février 1964.

(12) - G.H. NEWMAN

"Pore volume compressibility of reservoir rocks under hydrostatic Loading"

- Meeting of S.P.E. - Denver - April 1972.

(13) - J. GEERTSMA

"The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks"

- Petr. Trans. AIME - Vol. 210 (331 - 340) - 1957.

(14) - J. GEERTSMA

"Problems of rock mechanics in petroleum production engineering"

- Congrès international de mécanique des roches de LISBONNE (1966).

(15) - W. VAN DER KNAAP

"Nonlinear behavior of elastic porous media".

- Petr. Trans. Vol. 216 (179 - 187) - 1959.

(16) - F. GASSMANN

"Über die Elastizität poröser Medien"

- Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in ZÜRICH (1951)

- (17) - CARPENTER, C.B. and SPENCER, G.B.
"Measurements of compressibility of consolidated oil -
bearing sandstones"
- RI 3540, USBM (Octobre 1940).
- (18) - DOBRYNIN, V.M.
"Propriétés physiques des réservoirs d'huile et de gaz dans les
puits profonds"
- Izdatelstvo (éditions) "NEDRA", Moscow, 1965.
- (19) - J.D. BYERLEE
"An exact effective stress law for elastic deformation of rock
with fluids"
- Journal of geophysical research - Vol. 76, NO 26 (6414 - 6419 -
Septembre 1971).
- (20) - W.H. FERTL et D.J. TIMKO
"Utilisation des diagraphies en recherche, forage et production
d'hydrocarbures pour l'étude des problèmes de pressions géo-
statiques"
- Revue de l'I.F.P. N. 9 (687 - 714) - Septembre 1971.
- (21) - P. LE TIRANT
"Estimation des contraintes in situ à partir des résultats de
fracturation hydraulique".
- Revue de l'industrie minière - 15 Juillet 1969 (91 - 104).
- (22) - P. MORLIER
"Célérité et atténuation des ondes élastiques dans les roches
poreuses saturées".
- A.R.T.F.P. - Septembre 1968.

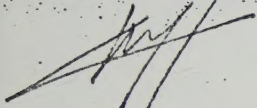
(23) - R. MONICARD

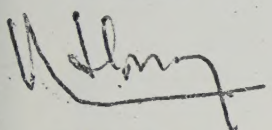
"Caractéristiques des roches réservoirs - analyse des carottes"
- Cours de production - Tome 1 - I.F.P. 1965.

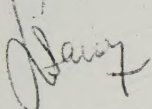
Vu.

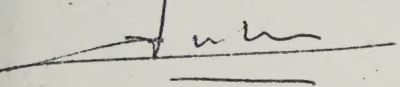
Les membres du jury :

C. EYRAUD


ALONSO


BARON

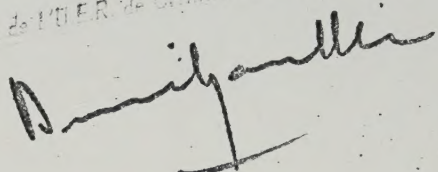

J. C. CUBAUD


P. GEVIN

Vu et approuvé.

Le Directeur de l'U.E.R.
de

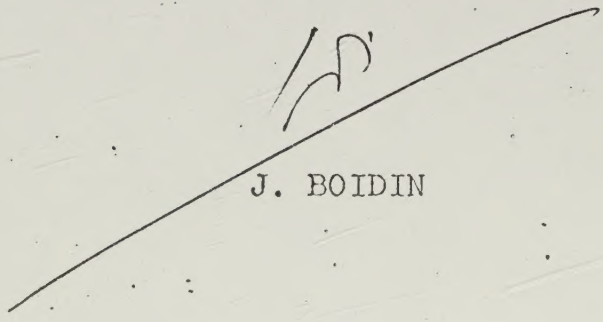
Le Directeur de l'U.E.R. de CHIMIE-BIOCHIMIE



Vu et accordé le permis d'imprimer.

Lyon, le 5 septembre 1972

Le Président de l'Université
Claude Bernard,


J. BOIDIN

